N° d'ordre :
39

THÈSES

PRESENTEES

A LA FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGENIEUR-DOCTEUR

PAR

FRANÇOIS GRISEL
Ingénieur diplômé de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics
et diplômé de l'Ecole Supérieure de Perfectionnement Industriel

1re THESE

SUR LES ECOULEMENTS D'EAU SOUS PRESSION
A TRAVERS UNE MASSE DE BETON

2e THESE

Propositions données par la Faculté

QUALITES ELECTROLYTIQUES
DES EAUX INDUSTRIELLES

Soutenues le décembre 1937, devant la Commission d'Examen

21 DEC. 1937

Jury { MM. E. DARMOIS, *Président*
J. VILLEY
F. CROZE } *Examinateurs*

N° d'ordre :
39

THÈSES

PRESENTEES

A LA FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGENIEUR-DOCTEUR

PAR

FRANÇOIS CRISEL
Ingénieur diplômé de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics
et diplômé de l'Ecole Supérieure de Perfectionnement Industriel

1re THESE

SUR LES ECOULEMENTS D'EAU SOUS PRESSION
A TRAVERS UNE MASSE DE BETON

2e THESE

Propositions données par la Faculté

QUALITES ELECTROLYTIQUES
DES EAUX INDUSTRIELLES

Soutenues le décembre 1937, devant la Commission d'Examen

Jury { MM. E. DARMOIS, *Président*
J. VILLEY } *Examinateurs*
F. CROZE }

Faculté des Sciences de l'Université de Paris

MM.

Doyen honoraire . . . . . M. MOLLIARD.
Doyen . . . . . C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe.

Professeurs honoraires

H. LEBESGUE.
A. FERNBACH.
Emile PICARD.
Léon BRILLOUIN.
GUILLET.
PECHARD.
FREUNDLER.
AUGER.

BLAISE.
DANGEARD.
LESPIEAU.
MARCHIS.
VESSIOT.
PORTIER.
MOLLIARD.
LAPICQUE.

G. BERTRAND.
ABRAHAM.
Ch. FABRY.
Léon BERTRAND.
WINTREBERT.
DUBOSCQ.
BOHN.

PROFESSEURS

M. Caullery	T	Zoologie (Evolution des êtres organisés).
G. Urbain	T	Chimie générale.
Emile Borel	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.
Jean Perrin	T	Chimie physique.
E. Cartan	T	Géométrie supérieure.
A. Cotton	T	Recherches physiques.
J. Drach	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
Charles Pérez . . .	T	Zoologie.
E. Rabaud	T	Biologie expérimentale.
M. Guichard . . .		Chimie minérale.
Paul Montel	T	Théorie des fonctions et théorie des transformations.
L. Blaringhem . .	T	Botanique.
G. Julia	T	Mécanique analytique et mécanique céleste.
C. Mauguin	T	Minéralogie.
A. Michel-Lévy . .	T	Petrographie.
H. Bénard	T	Mécanique expérimentale des fluides.
A. Denjoy	T	Application de l'analyse à la Géométrie.
L. Lutaud	T	Géographie physique et géologie dynamique.
Eugène Bloch . .	T	Physique.
G. Bruhat		Physique.
E. Darmois	T	Enseignement de physique.
A. Debierne	T	Physique Générale et Radioactivité.
A. Dufour	T	Physique (P.C.B.).
L. Dunoyer		Optique appliquée.
A. Guilliermond .	T	Botanique.
M. Javillier	T	Chimie biologique.
L. Joleaud		Paléontologie.
Robert-Lévy	T	Physiologie comparée.
F. Picard		Zoologie (Evolution des êtres organisés)
Henri Villat	T	Mécanique des fluides et applications.
Ch. Jacob	T	Géologie.
	T	Chimie minérale.
M. Fréchet	T	Calcul différentiel et Calcul intégral.
E. Esclangon . . .	T	Astronomie.
Mme Ramart-Lucas	T	Chmie organisée.
H. Béghin	T	Mécanique physique et expérimentale.
Foch		Mécanique expérimentale des fluides.
Pauthenier		Physique (P.C.B.).
De Broglie	T	Théories physiques.
Chrétien		Optique appliquée.
P. Job		Chimie générale.
Labrouste		Physique du Globe.
Prenant	T	Anatomie et histologie comparées.
Villey		Mécanique physique et et expérimentale.
Combes	T	Physiologie végétale.
Garnier	T	Mathématiques générales.
Pérés		Mécanique théorique des fluides.
Hackspill		Chimie (P.C.B.).
Laugier	T	Physiologie générale.
Toussaint		Technique aéronautique.
M. Curie		Physique (P.C.B.).
G. Ribaud	T	Hautes températures.
Chazy	T	Mécanique rationnelle.
Gault		Chimie (P.C.B.).
Croze		Recheches. Physiques.
Dupont	T	Théories chimiques.
Lanquine	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.
Valiron		Mathématiques générales.
Barrabé		Géologie structurale et Géologie appliquée.
Millot		Biologie animale (P. C.B.).
F. Perrin		Théories physiques.
Vavon		Chimie organique.
G. Darmois		Calcul des probabilités et Physique-Mathématique.
Chatton	T	Biologie maritime.
Aubel		Chimie biologique.
Jacques Bourcart .		Géographie physique et Géologie dynamique.
Mme Joliot-Curie .		Physique générale et Radioactivité.
Plantefol		Biologie végétale (P. C.B.).
Cabannes		Enseignement de physique.
Grasse		Biologie animale (P. C.B.).
Prévost		Chimie (P.C.B.).

Secrétaire . . . . A. PACAUD.
Secrétaire honoraire . . . D. TOMBECK.

RIJKS UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

A MON PERE

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

SUR LES ECOULEMENTS D'EAU SOUS PRESSION A TRAVERS UNE MASSE DE BETON

TABLE DES MATIERES

Pages

Note de l'auteur 9
Introduction 11

CHAPITRE I

La Perméabilité 15
Perméabilité à l'eau 15
Facteurs de la perméabilité 16
Composition chimique de l'eau 23
Bétons utilisés 24
Résumé 26

CHAPITRE II

Mesure de la perméabilité 29
Batterie de perméabilité 31
Erreurs de mesure 34
Résumé 37

CHAPITRE III

Influence du temps sur la perméabilité . . . 39
Graphique expérimental 41
Recherche pratique du coefficient de perméabilité . . . 48
Perméabilité d'un béton 51
Résumé 53

CHAPITRE IV

Pages

Influence de la pression sur la perméabilité . . 55
Influence de la pression sur les premiers écoulements . . 56
Variation du coefficient spécifique en fonction de la pression 59
Pression à l'intérieur du béton 67
Résumé 71

CHAPITRE V

Influence de l'épaisseur du béton 74
Variation de la pression interne 74
Variation de la perméabilité 75
Influence du sens du passage de l'eau sur la perméabilité . 77
Processus de colmatage 79
Résumé 81

CONCLUSION 82

NOTE DE L'AUTEUR

La présente étude, que nous soumettons à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, pour obtenir le titre d'Ingénieur-Docteur, a pour but d'étudier plus spécialement quelques unes des propriétés physiques du phénomène de la perméabilité des bétons. Elle a été entreprise au laboratoire des recherches de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics, sous la direction de Monsieur le Professeur E. DARMOIS.

Nous sommes heureux de remercier ici, respectueusement Monsieur E. DARMOIS, Professeur de Physique Générale à la Faculté des Sciences, qui a bien voulu guider nos recherches expérimentales et nous encourager avec bienveillance.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à M. J. VILLEY, Professeur de Mécanique Physique et Expérimentale, Directeur honoraire au Ministère de l'Air, pour son inlassable bienveillance et ses nombreux conseils, ainsi qu'à Monsieur A. CAQUOT, membre de l'Institut, qui a bien voulu s'intéresser à notre étude et faciliter grandement nos expériences par ses suggestions.

Nous assurons de notre vive et sincère reconnaissance Monsieur A. COTTON, membre de l'Institut, Professeur de Recherches Physiques à la Faculté des Sciences, pour la bienveillante attention qu'il a prêté, lors de l'exposé que nous lui avons fait de notre étude, ainsi que Monsieur F. CROZE, Professeur à la Faculté des Sciences, qui a bien voulu faire partie de la commission d'Examen.

Nous remercions très sincèrement, Monsieur L. EYROLLES, Ingénieur-Directeur de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie, dont le laboratoire des recherches nous a permis de faire nos essais dans les meilleures conditions, ainsi que

Monsieur H. MASSON, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, sous-Directeur de l'Ecole, qui s'est intéressé directement à nos recherches.

Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur F. BARTHES, Professeur à l'Ecole, qui a bien voulu nous faire profiter de sa grande érudition et nous prodiguer de nombreux conseils et de précieux encouragements.

Nous tenons, enfin, à renouveler toute notre gratitude et à exprimer toute notre reconnaissance à Monsieur O. YADOFF, Ingénieur-Docteur, Chef du laboratoire des recherches de Cachan, ainsi qu'à Monsieur E. GAZEL, Professeur à l'Ecole, qui nous ont guidé pendant toute notre étude et nous ont fait profiter de leurs très grandes compétances en nous évitant un certain nombre de tâtonnements.

INTRODUCTION

Cette étude « sur les écoulements d'eau sous pression à travers une masse de béton » est une contribution à l'ensemble des recherches déjà faites sur le sujet beaucoup plus général de la perméabilité des bétons.

La question de la perméabilité du béton est très intéressante à connaître pratiquement pour les constructions en béton, armé ou non, celles-ci étant, dans la plupart des cas, au contact d'eau sous pression d'intensité variable, mais rarement négligeable ; il en résulte des suintements ou des écoulements importants pouvant entraîner de dangereuses dégradations. C'est une question néanmoins encore assez mal étudiée, étant donné que l'on ne connaît actuellement, ni les relations existant entre la perméabilité et les propriétés physiques des bétons, ni l'influence de la composition et de la préparation du béton sur sa perméabilité. Les expériences faites, en effet, par les différents laboratoires d'essais de matériaux consistaient surtout dans la comparaison des valeurs numériques des écoulements produits, pendant un temps donné, à travers des échantillons de bétons de compositions différentes ou de mêmes bétons plus ou moins additionnés de produits imperméabilisants.

La seule étude systématique est récente : elle a été faite par Monsieur MARY, Ingénieur des Ponts et Chaussées, qui est arrivé à cette conclusion, que les filtrations produites diminuent avec le temps. Ses expériences ont surtout porté sur les phénomènes chimiques de la perméabilité et la recherche des « hydrofuges »; elles

ont permis de constater que l'augmentation de l'étanchéité avec le temps était générale quelle que soit la nature chimique de l'eau de filtration,

Nous nous sommes attachés surtout à étudier la perméabilité au point de vue physique en considérant particulièrement, d'abord l'influence du temps et ensuite celle de la pression.

A cet effet, nous avons procédé à une série d'expériences sur les écoulements d'eau sous pression constante à travers un grand nombre d'échantillons de bétons de compositions différentes mais courantes dans les travaux publics et les ouvrages en béton armé. L'eau utilisée a été prise sans précautions spéciales sur la conduite de distribution urbaine et les expériences ont été exécutées sous des pressions assez élevées, correspondant à plusieurs dizaines de mètres de « hauteur d'eau ». Ces pressions se rencontrent assez rarement en pratique, sauf dans certains cas particuliers : nous ne les avons utilisées que pour « dégrossir » le phénomène général, ayant remarqué que les essais sous faibles pressions, de l'ordre de 1 à 2 Kg. par cm², ne sont pas susceptibles d'être interprétés facilement.

A la suite de ces expériences, nous avons été conduit à mettre en évidence une loi relative à la variation de la perméabilité en fonction du temps. Cette loi, de forme hyperbolique, nous a permis de définir un coefficient indépendant du temps et spécifique de la perméabilité d'un béton soumis à une pression constante.

Le coefficient spécifique se détermine rapidement en faisant intervenir le volume d'eau écoulé pendant un intervalle de temps arbitrairement choisi. En effet, ce volume d'eau étant une fonction linéaire du logarithme du temps, sa représentation graphique ne demande qu'une seule lecture de volume, ce qui diminue les erreurs provenant des mesures successives. De plus, le coefficient angulaire de cette droite est précisément égal au coefficient spéci-

tique de la perméabilité, et le graphique rectiligne semble donc, par suite de sa simplicité, permettre une comparaison rapide de différents bétons : sa détermination a fait l'objet d'une note que Monsieur A. CAQUOT a bien voulu présenter à l'Académie des Sciences (1).

Pour compléter notre étude, nous avons fait intervenir des pressions variables et nous avons constaté expérimentalement que la perméabilité n'est pas une fonction uniforme de la pression : il est toutefois possible d'obtenir des résultats systématiques en ayant soin d'opérer de telle sorte que la variation de pression se fasse toujours et successivement dans le même sens. Dans ce cas, et dans les limites que nous avons utilisées, la variation du coefficient spécifique est linéaire en fonction de la pression.

Nous avons étudié également certains autres phénomènes concernant, en particulier, la valeur de la pression à l'intérieur de la masse du béton, ainsi que l'influence du sens du passage de l'eau sur la perméabilité. Tous ces différents essais ont été effectués sur des échantillons de bétons de compositions courantes en construction et soumis à des pressions rigoureusement constantes.

Après avoir énuméré, dans le chapitre I, les principaux facteurs de la perméabilité du béton, nous spécifions les différentes compositions utilisées ainsi que l'origine des agrégats.

Dans le chapitre II, nous définissons la mesure de la perméabilité et décrivons le dispositif expérimental du laboratoire de Cachan qui permet cette mesure. Nous analysons, ensuite, les différentes erreurs de mesure qui peuvent être commises.

Le chapitre III traite de l'influence du temps sur la perméabilité et la détermination pratique du coefficient spécifique.

Nous étudions au chapitre IV l'influence générale de la pression sur la permébilité et, en particulier, la variation du coefficient

---

(1) Comptes-rendus de l'Académie des Sciences: t. 203, p. 1531, 14 décembre 1936

spécifique avec une variation croissante de la pression. Nous donnons dans ce même chapitre, les résultats obtenus d'après une expérience permettant de mesurer la pression de l'eau à l'intérieur de la masse du béton.

Le chapitre V traite, enfin, de la variation de la pression interne avec l'épaisseur traversée et de l'influence du sens du passage de l'eau sur les écoulements recueillis. Nous exposons, pour terminer, le processus suivant lequel le colmatage se produirait dans la masse même du béton.

CHAPITRE I.

LA PERMEABILITE

La perméabilité est la propriété que possèdent certains corps ou matériaux, homogènes ou hétérogènes, de se laisser traverser par des fluides sous l'effet d'une différence entre les pressions qui s'exercent sur deux faces opposées de ces corps.

Le béton, comme la plupart des matériaux de construction, en particulier les pierres naturelles ou artificielles, est perméable: c'est un résultat expérimental. Sa perméabilité dépend surtout de la dimension des plus grands intervalles existant dans la structure de la masse et du diamètre des canaux par lesquels ces intervalles communiquent entre eux.

PERMEABILITE A L'EAU

La perméabilité la plus importante au point de vue pratique est celle du béton en contact avec des eaux sous pression.

En effet, depuis que le béton est employé couramment en construction, il a été constaté que l'eau imprégnait les pores capillaires des bétons exécutés soit pour des ouvrages de retenue d'eau (comme dans le cas de barrages, murs de quai, canalisations sous pression, réservoirs), soit pour les infrastructures (par exemple pour des semelles de fondation, tunnels et radiers), soit enfin pour des superstructures s'il s'agit de murs de soutènement ou de terrasses. L'eau sous pression, retenue par la paroi d'un massif de béton, s'infiltre à travers celui-ci et il en résulte des

suintements ou des écoulements importants pouvant entraîner la dégradation des ouvrages. Aussi les ingénieurs se sont-ils mis à étudier cette propriété du béton et à rechercher les différents moyens susceptibles, sinon de s'opposer complètement au passage de l'eau, tout au moins de diminuer l'importance des filtrations qui se produisent.

Dans ce but, les laboratoires d'essais de matériaux ont fait de nombreuses expériences en mélangeant certaines substances aux constituants du béton au moment de son gâchage. Désignées sous le nom d' « hydrofuges », ces substances peuvent avoir deux origines, l'une minérale et l'autre organique : dans la première catégorie peuvent se ranger le kieselghur (1) et en général les diatomées, dans la seconde les oléates, les huiles lourdes (1) et la colle d'os (3).

Malheureusement, si ces hydrofuges augmentent l'étanchéité, ils agissent également sur les autres propriétés du béton en diminuant presque toujours sa résistance à la compression. C'est la raison pour laquelle ils ne sont pas recommandés, en général, en construction, et semblent même presque complètement abandonnés, sauf dans des cas très particuliers, par exemple pour assurer l'étanchéité d'une terrasse.

Nous avons étudié uniquement la perméabilité en elle-même en prenant des bétons ordinaires sans aucune addition de produits imperméabilisants. Nous avons déterminé, dans ces conditions, l'influence de quelques uns des différents facteurs agissant, effectivement, sur les écoulements obtenus.

FACTEURS DE LA PERMEABILITE.

La perméabilité d'un béton en contact avec des eaux sous

(1) Etude de M. MARY (Annales des Ponts et Chaussées : Nov. Déc. 1934)
(2) Etude de M. FERET (Annales des Pontes et Chaussés : V 1913)
(3) Etude de M. LAFUMA (Annales des Ponts et Chaussées : Sept. 1935)

pression semble être fonction de plusieurs facteurs dépendant soit des conditions expérimentales, soit du béton lui-même.

En considérant la température ambiante comme constante, les principaux facteurs expérimentaux agissant sur la perméabilité du béton sont, d'une part, le temps ou la durée de la pression et, d'autre part, l'intensité de la pression. On constate, en effet, que la perméabilité est une fonction décroissante du temps et qu'elle varie dans le même sens que la pression : nous avons étudié tout particulièrement l'influence de ces deux facteurs en établissant, en premier lieu, la variation de la perméabilité en fonction du temps ou durée de la pression, puis en déterminant l'influence d'une augmentation ou d'une diminution de pression.

Les autres facteurs agissant sur la perméabilité dépendent du béton. Pour mettre en évidence leurs rôles, il nous paraît indispensable de rappeler brièvement ce que l'on désigne sous le nom de béton.

Le béton est un composé hétérogène de ciment, de gravier (élément dont le diamètre est compris entre 10 et 20 mm.), de sable (diamètre inférieur à 5 mm.) et d'une certaine quantité d'eau de gâchage. Le rôle du gravier consiste à augmenter la résistance propre du mortier formé par le ciment, le sable et l'eau.

Un béton est caractérisé par le dosage du ciment par mètre-cube et par les rapports :

$$\frac{\text{gravier}}{\text{sable}}, \quad \frac{\text{ciment}}{\text{sable} + \text{gravier}}, \quad \frac{\text{eau}}{\text{ciment}}.$$

Sa qualité dépend, essentiellement, des différentes proportions des constituants et ses propriétés (résistances à la compression

ou à la traction, adhérence, etc...) sont essentiellement fonctions de son âge, c'est à dire du temps écoulé à partir de la mise en œuvre.

Il est reconnu qu'un béton sera d'autant plus étanche que son dosage en ciment sera plus élevé. En pratique, on ne peut agir sur le dosage sans augmenter considérablement le prix de revient et s'exposer aux fissures dûes au « retrait » du ciment après sa prise. De plus, la résistance diminue avec une augmentation d'eau de gâchage (fig. I), et les ingénieurs sont amenés à ne faire varier le rapport $\frac{\text{eau}}{\text{ciment}}$ qu'entre des limites bien définies pour ne pas avoir des bétons trop plastiques qui sont à éviter en construction. Il en résulte que l'on ne peut augmenter le dosage qu'en surface, par application d'une chape de ciment de faible épaisseur sur la paroi directement au contact de l'eau.

Au point de vue de l'étanchéité, l'étude de la granulométrie des agrégats est beaucoup plus intéressante. En effet, quelque soit le mode de serrage utilisé (pilonnage, vibration, etc.) au moment de la mise en œuvre du béton, celui-ci ne constitue pas rigoureusement un monolithe. Il existe, dans la masse, des canaux capillaires entre les différents éléments du mortier par lesquels les infiltrations d'eau se produisent. On peut constater, expérimentalement, la pénétration de l'eau à l'intérieur et jusqu'au centre des bétons conservés sous l'eau : cette pénétration devient beaucoup plus active si l'eau est sous pression.

Nous avons vu que l'imprégnation par l'eau des corps ou matériaux dépend surtout du nombre et du diamètre des canaux capillaires existant dans la structure interne de la masse. Tandis que pour les pierres naturelles cette structure ne peut être changée, il est possible de modifier celle du béton en étudiant avec soin la granulométrie, c'est à dire le pourcentage des différentes grosseurs de sable à employer simultanément. Dans ce but, on

utilise généralement pour la composition du mortier d'un béton les trois sables suivants :

Sable gros : grains dont le diamètre est compris entre 2 et 5 mm.
Sable moyen : grains dont le diamètre est compris entre 0,5 et 2 mm.
Sable fin : grains dont le diamètre est inférieur à 0,5 mm.

Ces trois catégories de sable sont prises dans certaines pro-

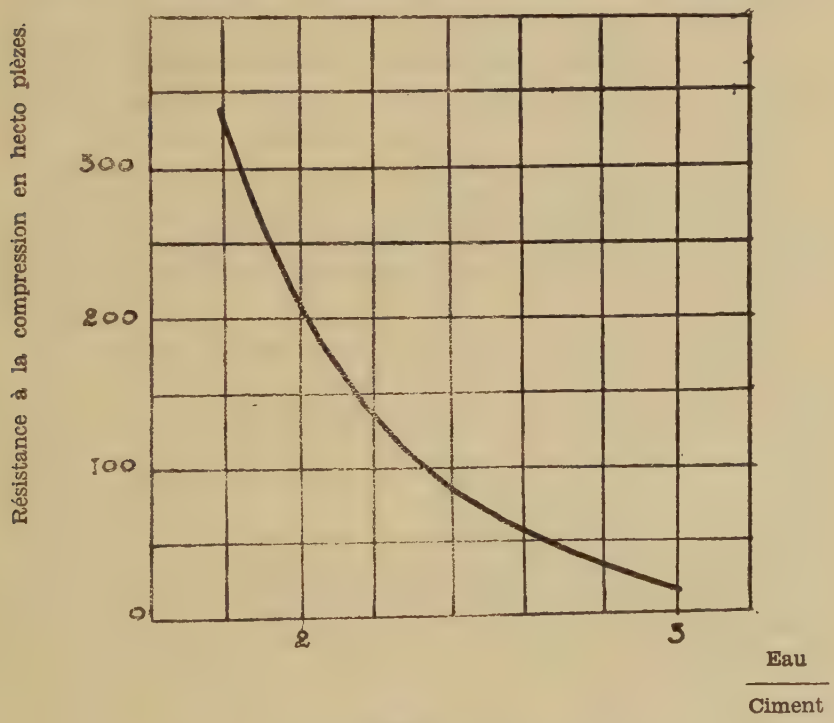


Fig. I

(D'après M. Marcotte : Génie Civil, 14 août 1934)

portions, de manière à obtenir un mortier admettant le minimum de « vides », c'est à dire ayant le maximum de compacité (4).

La nature du sable a également une certaine influence sur les propriétés générales d'un béton. Les laboratoires d'essais ont pu constater que les sables calcaires, marbreux, coquilliers et siliceux sont les meilleurs; que les sables à grains arrondis laissent moins de vides que les sables anguleux; enfin, que la compacité d'un béton varie en raison inverse de la teneur du mortier en grains fins de sable.

Nous nous sommes rapportés, au point de vue granulométrique, aux compositions que Monsieur GAZEL, chef du laboratoire d'essais de matériaux de CACHAN, avait déjà utilisées pour des recherches antérieures sur la perméabilité, compositions qui avaient donné de bons résultats pratiques, c'est à dire que les bétons n'étaient ni trop peu, ni trop perméables sous des pressions d'eau variant de 2 à 8 Kg. par cm^2. Nous précisons, par la suite, ces diverses compositions et nous spécifions l'origine des agrégats utilisés.

Un autre facteur agissant sur la perméabilité du béton, est le mode de serrage ou traitement mécanique que subit le béton après coulage. Ce traitement est très important et permet, en particulier, de diminuer d'une façon très appréciable le rapport $\frac{\text{eau}}{\text{ciment}}$ tout en ayant un béton facilement ouvrable.

Les principaux serrages employés couramment sur les chantiers sont : le damage, le pilonnage, la vibration mécanique du coffrage et la pervibration ou vibration mécanique de la masse même du béton.

---

(4) La compacité du mortier contenu dans 1 mètre cube de béton se définit, en volume, par le rapport : $\frac{\text{ciment + sable}}{1 - \text{gravier}}$

Le damage, n'agissant que sur une couche superficielle de faible épaisseur, a été écarté à priori. Les autres modes de serrage intéressent la masse de béton à des degrés diférents suivant leurs intensités. Le serrage utilisé dans nos expériences a été le pilonnage pour la raison suivante :

Une étude expérimentale de la perméabilité ne peut se faire correctement qu'en obtenant des écoulements assez importants de manière que les résultats ne soient pas déformés par des phénomènes secondaires possibles. La vibration et la pervibration, donnant un excellent serrage des constituants, permettent d'obtenir une très bonne étanchéité du béton qui se traduit pratiquement par des écoulements très faibles. Aussi avons-nous délaissé les serrages mécaniques pour faire toutes nos expériences sur des bétons simplement pilonnés à la main.

Enfin, un important facteur agissant sur la perméabilité est le mode de conservation du béton pendant sa prise. On peu constater expérimentalement que deux bétons provenant de la même gâchée, l'un conservé à l'air, l'autre sous une masse d'eau deux jours après la prise, ont des perméabilités totalement différentes. Dans la plupart des cas, un béton conservé sous l'eau a une étanchéité à peu près définitive dès les premiers jours, et l'étanchéité est même totale pour certains d'entre eux, aucun suintement ne se produisant sur la face du béton opposée à celle qui est au contact de l'eau sous une pression donnée.

L'étanchéité obtenue par une conservation à l'eau peut s'expliquer par une carbonatation beaucoup plus efficace que celle obtenue au contact de l'air. En effet, les eaux contenant toujours de la chaux sous forme de bicarbonate, il se forme au contact de la chaux diffusée (5) à travers la masse du béton (fig. II) un pré-

(5) Après la prise d'un béton il y a environ 30% de chaux libre. Une fois cette chaux diffusée, l'eau attaque le béton, plus ou moins suivant sa nature, en diffusant la chaux combinée.

cipité de carbonate de chaux sous forme d'une pellicule insoluble pratiquement étanche. La conservation sous l'eau est, d'autre part, accompagnée de certains phénomènes physiques, tels qu'un « gonflement » du béton, et de réductions chimiques avec formation de nouveaux complexes. Ces phénomènes, encore mal connus, se traduisent pratiquement par une très forte augmentation de l'étanchéité.

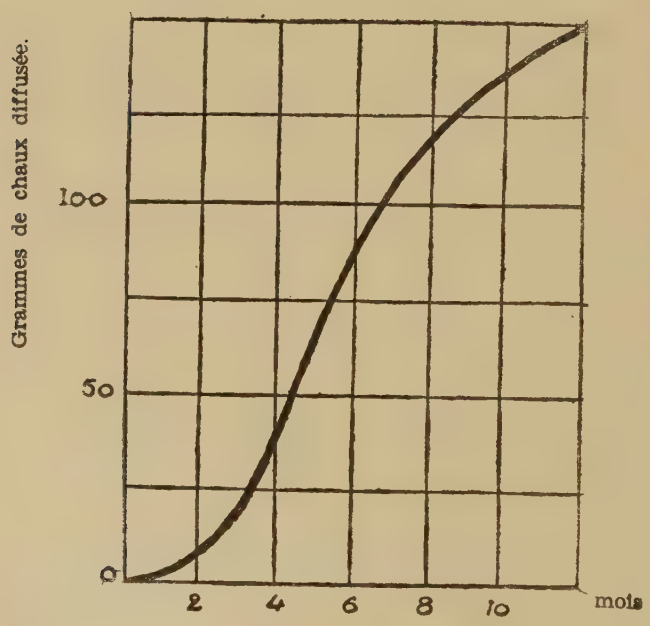


Fig. II

(D'après M. Camerman. «Résistance des mortiers hydrauliques à la mer».)

COMPOSITION CHIMIQUE DE L'EAU.

Nous avons vu que les écoulements d'eau à travers une masse de béton diminuent avec le temps ou durée de la pression. On peut se demander si ce phénomène n'est pas fonction de la composition chimique de l'eau de filtration.

La diminution, avec le temps, des écoulements d'eau était autrefois expliquée en admettant que les canaux du réseau capillaire formé par les vides du mortier étaient obturés par les poussières et impuretés se trouvant en suspension dans l'eau.

Monsieur MARY, Ingénieur des Ponts et Chaussées, a démontré expérimentalement que le phénomène se produisait également avec de l'eau distillée (6) : l'hypothèse précédente n'était donc plus admissible.

En procédant, au laboratoire des Ponts et Chaussées, à de nombreuses expériences, Monsieur MARY a constaté que la filtration d'une eau calcaire à travers une masse de béton produisait un étanchement progressif dû à un colmatage dont le processus serait le même que celui obtenu par une conservation à l'eau. Monsieur MARY a utilisé, à cet effet, comme eau de filtration, une eau industrielle tirant 0,110 gr. de chaux par litre et une eau potable titrant 0,086 gr. de chaux par litre. Ses expériences ont montré que :

1. - Le volume des écoulements varie en sens inverse de la quantité de chaux contenue dans l'eau au contact du béton.

2. - L'eau de filtration s'enrichit en chaux après avoir traversé le béton.

---

(6) Etude de M. MARY (Annales des Ponts et Chaussées : Mai-Juin 1933).

3. - L'enrichissement en chaux de l'eau de filtration diminue au fur et à mesure de la durée de l'essai.

En utilisant de l'eau distillée, Monsieur MARY a constaté que l'étanchement du béton existe toujours tout en étant cependant beaucoup moins énergique que celui obtenu avec une eau de filtration calcaire. De même que les phénomènes accompagnant la conservation à l'eau, le processus chimique de l'étanchement est mal connu dans le cas de l'eau distillée. Le phénomène physique (diminution avec le temps de l'importance des écoulements) reste, toutefois, le même que celui obtenu avec une eau calcaire. En conséquence, nous avons utilisé pour toutes nos expériences, une eau potable prise sans précautions spéciales sur la conduite de distribution du laboratoire de CACHAN et titrant en moyenne 0,100 gr. de chaux par litre.

BETONS UTILISES.

Les compositions des différents bétons soumis aux essais de perméabilité dans nos expériences sont celles normalement employées dans le béton armé et les travaux publics. Le ciment est un ciment artificiel de qualité absolument courante. Les sables utilisés sont des sables de rivière et le gravier est composé de pierres roulées.

Les bétons ont été gâchés dans une bétonnière de façon à se rapprocher le plus possible des conditions pratiques du chantier et ont été simplement pilonnés à l'aide d'une barre d'acier de 10 mm. de diamètre. Ils ont été conservés soit à l'air, soit dans l'eau.

Nous avons représenté (fig. III) une courbe granulométrique de l'un des agrégats en portant en abscisses le diamètre des mailles des différents tamis, et en ordonnées le pourcentage de l'agrégat retenu par chaque tamis.

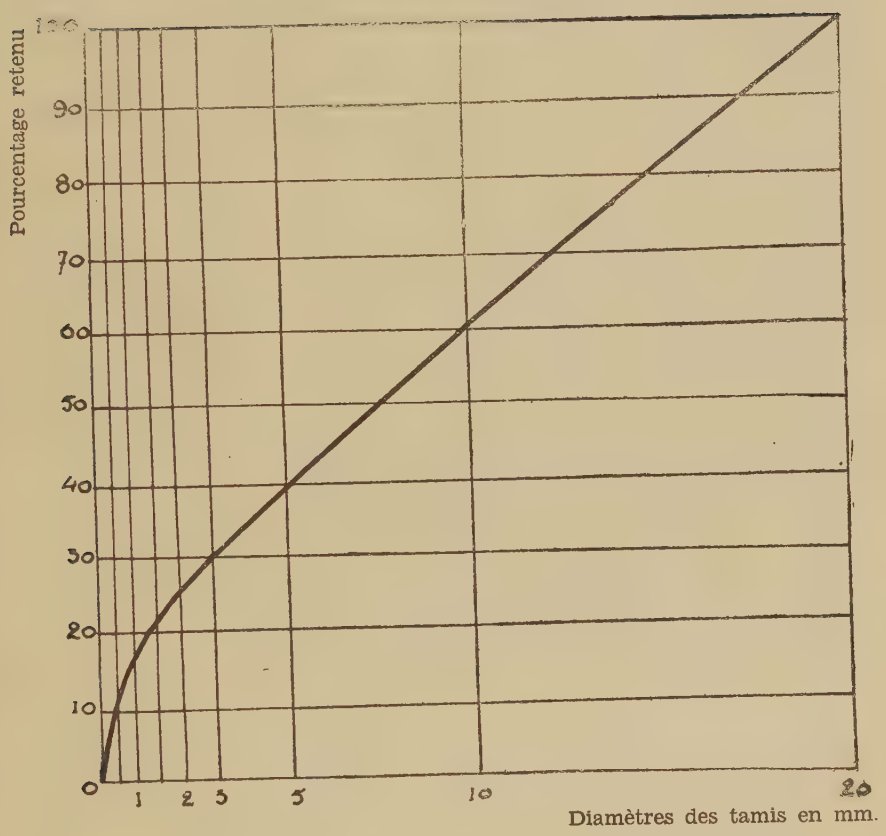


Fig. III

Courbe granulométrique relative aux bétons de la série G_1 (Voir tableau I)

Les tableaux I et II donnent les dosages, compositions, conservations et résistances des différents bétons employés. Les essais de résistance à la compression ont été faits, à l'aide d'une presse « MORANE », sur des échantillons cubiques provenant de la même gâchée.

RESUME.

Dans ce premier chapitre nous avons rappelé ce qu'il faut entendre par « perméabilité d'un béton » et l'intérêt pratique de sa connaissance au point de vue des différentes constructions.

Après avoir examiné les principaux facteurs agissant sur la perméabilité, nous avons limité cette thèse à la recherche de l'influence des facteurs « temps » et « pression » c'est-à-dire à une étude physique des écoulements d'eau à travers un béton. L'eau est une eau potable de distribution et les différents bétons, de compositions courantes, sont simplement pilonnés.

L'influence de quelques autres facteurs agissant sur la perméabilité, tels que le sens du passage de l'eau et l'épaisseur du béton, est étudiée dans le chapitre V.

TABLEAU I

Dosage — Composition

Béton	Dosage	Granulométrie				
		Gravier / Sable	Pourcentage de sable			Eau / Ciment
			gros	moyen	fin	
G_1	330	1,5	40	40	20	0,6
G_2	350	1,9	60	—	40	0,5
G_3	360	2	60	—	40	0,5
G_4	300	1,5	40	40	20	0,6

TABLEAU II

Conservation — Résistance

Béton	Conservation en jours		Résistance
	à l'air	à l'eau	en kg./cm²
G_1	7	—	240
	28	—	360
	120	—	410
G_2	42	—	362
	—	42	347
G_3	150	—	444
	—	150	311

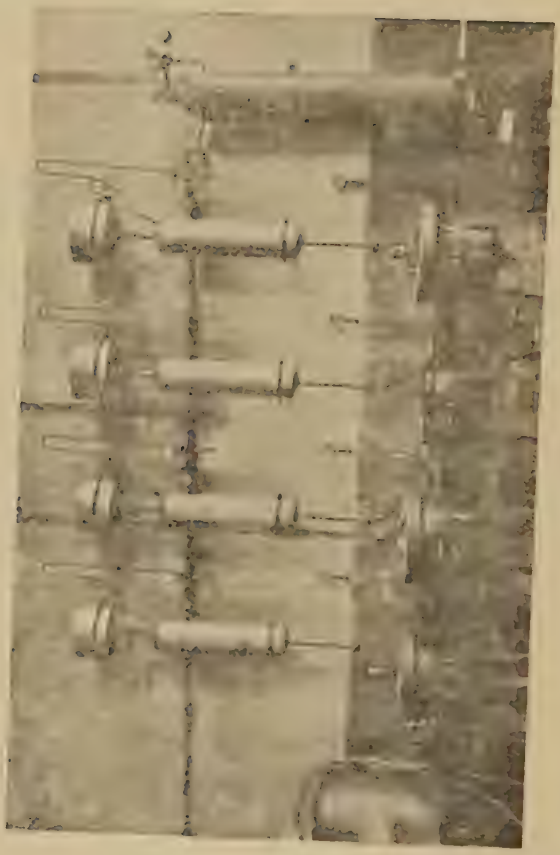


Fig. IV.

Vue générale de la batterie de perméabilité du laboratoire de Cachan.

CHAPITRE II.

MESURE DE LA PERMEABILITE

Les considérations précédentes ont montré que l'importance des filtrations d'eau se produisant à travers une masse de béton dépendait de plusieurs facteurs principaux. Pour étudier les écoulements il faut donc commencer par choisir une variable : le choix doit être tel qu'il soit possible d'étudier ensuite l'influence des autres facteurs en partant des variations des écoulements en fonction de la variable choisie comme variable principale.

Ces écoulements peuvent se définir et se mesurer par le volume recueilli pendant un intervalle de temps donné : il suffit, à cet effet, de disposer les expériences de façon que les autres facteurs puissent être considérés comme constants, et de préciser les conditions dans lesquelles les mesures successives sont faites.

En particulier la mesure de la perméabilité d'un béton de composition parfaitement définie se déterminera, en fonction du temps, sous une pression donnée et constante. Cette mesure se fait au laboratoire à l'aide d'une batterie de perméabilité sur un échantillon de béton à étudier.

Le principe du dispositif consiste à isoler latéralement cet échantillon, qui en pratique ferait partie de la masse d'une construction, et à contraindre l'eau au contact de la face supérieure à le traverser de la face supérieure à la face inférieure sans qu'il y ait de pertes latérales.

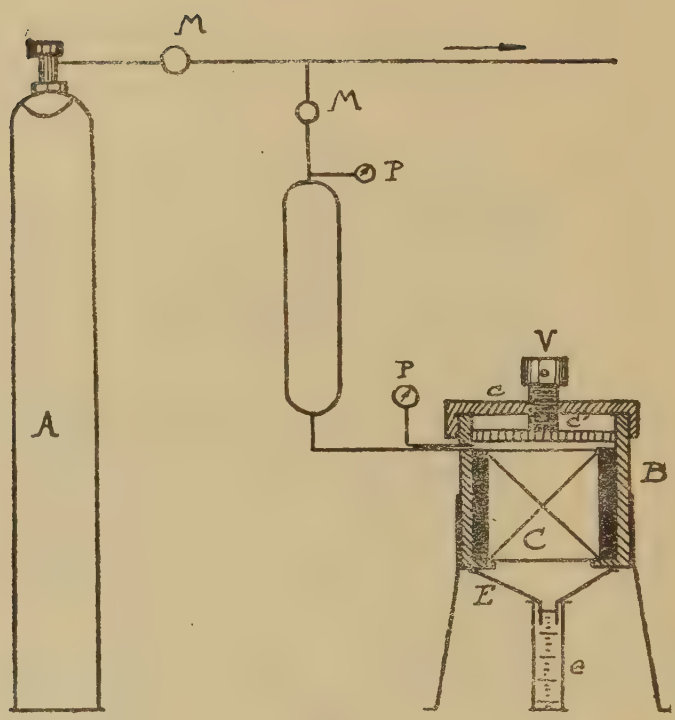


Fig. V
Schéma du dispositif.

Nomenclature

A	Bouteille d'air comprimé.
B	Brai solidifié assurant l'étanchéité latérale.
C	Eprouvette cubique de béton.
c	Faux couvercle.
c'	Couvercle
E	Entonnoir.
e	Eprouvette graduée.
M	Mano-détendeur.
P	Manomètre.
V	Vis.

Les échantillons de bétons sont des cubes de 20 cm. d'arète (1) dont l'étanchéité latérale est assurée au moyen de brai. Avant d'être soumis aux essais de perméabilité les cubes sont soigneusement piqués à la boucharde sur toutes leurs faces de manière à enlever la couche superficielle de lait de ciment : cette opération a pour but d'augmenter l'adhérence latérale du brai au béton et de permettre une infiltration d'eau dans les mêmes conditions que dans la pratique. L'échantillon est alors mis en place dans l'un des pots de la batterie de perméabilité. Nous reproduisons (fig. IV) une vue générale de l'installation réalisée au laboratoire d'essais de matériaux de CACHAN.

BATTERIE DE PERMEABILITE.

La batterie de perméabilité comprend quatre pots branchés séparément sur une canalisation d'air comprimé, dispositif qui permet de faire des essais indépendants les uns des autres (fig. V). Chaque pot communique par une tuyauterie avec un réservoir en fer étamé d'une contenance de 10 litres. Le remplissage du réservoir s'obtient en versant préalablement l'eau dans un récipient disposé à cet effet à sa partie supérieure. Un robinet permet, après remplissage total, d'empêcher toute communication avec l'extérieur.

L'eau contenue dans le réservoir est mise directement en pression : dans ce but le sommet du réservoir est relié à la canalisation

(1) La forme géométrique des échantillons pour les essais de perméabilité est variable suivant les laboratoires : tronc-conique (Laboratoire des Ponts et Chaussées) ou cylindrique (Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics). Le laboratoire d'essais de matériaux de Cachan qui s'est occupé le premier de la question de la perméabilité, utilise des cubes, ce qui permet d'obtenir par écrasement de l'échantillon, la valeur de la résistance à la compression après essais de perméabilité.

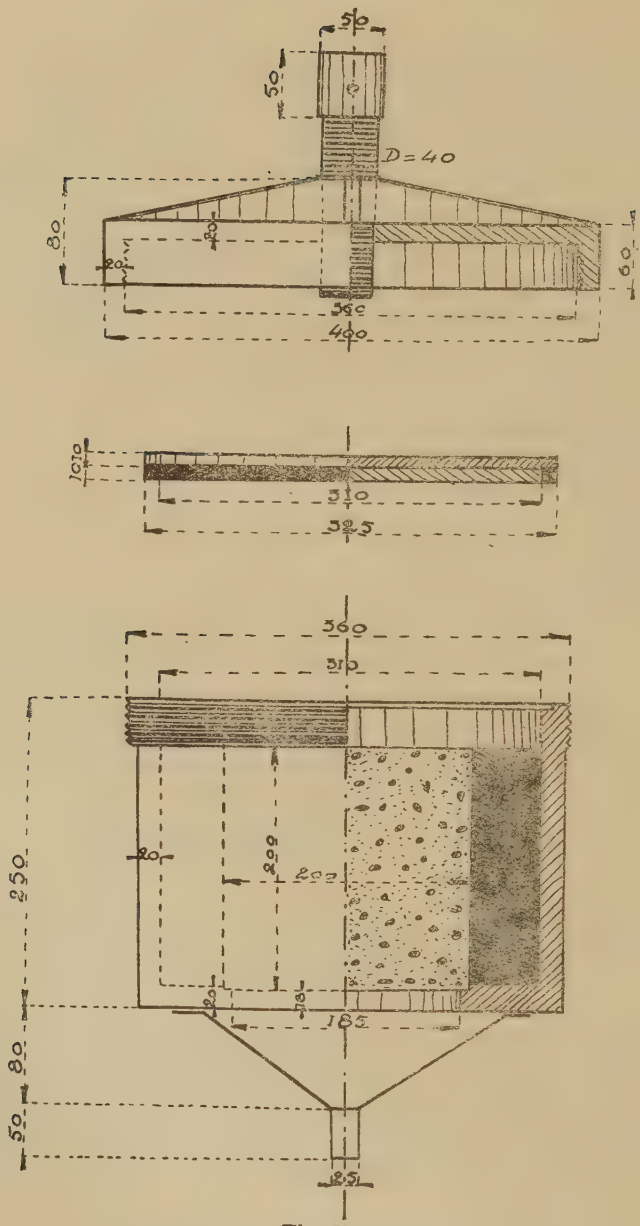


Fig. VI
Détail d'un pot de perméabilité.

d'air comprimé et un mano-détendeur permet de régler la pression à volonté. Un manomètre branché sur l'ajutage du tuyau d'amenée de l'eau à l'intérieur du pot de perméabilité, donne avec précision la pression à l'intérieur du dispositif.

Le pot de perméabilité, de forme cylindrique, est en fonte. Il comporte, à sa partie inférieure, un logement dans lequel vient s'engager la face inférieure du cube : à cet effet on a eu soin, au moment du bouchardage des faces de l'échantillon, de laisser sur l'une d'elles une marge latérale non bouchardée de 15 mm. de façon que le cube repose correctement dans ce logement. Le pot de perméabilité est évidé circulairement pour permettre de recueillir, par l'intermédiaire d'un entonnoir, les écoulements d'eau ayant traversé le béton de part en part. Ces écoulements sont mesurés dans une éprouvette graduée.

L'étanchéité des faces verticales du cube est assurée en coulant du brai entre celles-ci et les parois latérales du pot de perméabilité (fig. VI). Le brai utilisé est un brai de gaz dont le point de fusion est voisin de 80°. Il est coulé liquide et l'opération demande quelque soin. En effet, la face inférieure du cube n'étant pas rigoureusement plane, ne repose pas exactement dans son logement. Il faut donc commencer par couler une petite quantité de brai de façon à assurer une étanchéité totale entre le cube et la partie inférieure du pot. Une fois cette couche solidifiée, le remplissage est poursuivi jusqu'à la face supérieure du cube. Des retassures se produisent après refroidissement du brai et il devient nécessaire d'en couler une nouvelle quantité de façon que le niveau de celui-ci vienne affleurer exactement la face supérieure de l'échantillon: cette opération est indispensable pour assurer l'étanchéité latérale parfaite du cube sous une pression d'eau de 8 kg. par cm^2.

Le pot de perméabilité est fermé à sa partie supérieure successivement par un couvercle et un faux-couvercle. Le couvercle est un disque ayant même alésage que le pot; il est muni d'un joint

circulaire plastique assurant une étanchéité complète. Son rôle est de répartir uniformément la pression sur la face supérieure de l'échantillon cubique. Le faux-couvercle est vissé directement sur le pot, qui est fileté à cet effet à sa partie supérieure. Une vis, solidaire du faux-couvercle et prenant appui au centre du couvercle peut se manœuvrer de l'extérieur : elle permet de résister à la pression développée par l'eau à l'intérieur du dispositif.

La batterie de perméabilité du laboratoire de CACHAN permet de réaliser au maximum une pression d'eau de 8 kg. par cm². Pour notre étude nous avons fait de nombreuses expériences sous des pressions variant de 2 à 8 kg. par cm².

ERREURS DE MESURE.

Les erreurs sur la mesure de la perméabilité d'un béton peuvent dépendre soit d'une variation de la pression, soit d'une erreur sur la lecture du volume de l'écoulement d'eau recueilli.

Les mesures de la perméabilité se faisant sous pression théoriquement constante, la première erreur à craindre est celle consécutive à une légère variation de la pression de l'eau au contact de l'échantillon de béton : le manomètre étant réglable à l'aide d'un mano-détendeur, cette pression peut être rendue constante pendant toute la durée d'un essai.

Lorsque le remplacement de la bouteille d'air devient nécessaire, toute la canalisation est bloquée pendant le temps indispensable à la mise en service d'une nouvelle bouteille. Cette opération n'excédant pas une durée de 15 minutes, on peut admettre que la légère chute de pression, consécutive à la fermeture de la canalisation d'eau, amène pratiquement une perturbation négligeable.

Les erreurs suivantes intéressent les lectures du volume des écoulements.

La première provient de la durée effective pendant laquelle les

écoulements sont recueillis. Les éprouvettes graduées sont relevées à intervalles réguliers, toutes les 24 heures, de façon que toutes les lectures soient faites après le même intervalle de temps. L'heure de lecture étant exacte à 5 minutes près, au maximum, l'erreur commise est négligeable.

Une deuxième erreur à craindre est dûe à l'évaporation, les lectures des écoulements ne se faisant que toutes les 24 heures. Pour éviter cette évaporation dans la mesure du possible, il y a avantage à étendre une légère pellicule d'huile de vaseline au niveau supérieur des écoulements recueillis. Un carton percé d'un orifice circulaire permettant le passage du col de l'entonnoir, est également disposé au sommet de l'éprouvette graduée. De plus une éprouvette témoin, identique à l'éprouvette recueillant les écoulements et contenant un volume et un poids déterminé d'eau, est placée au voisinage de la batterie de perméabilité. Les lectures du volume, et d'une manière plus précise, les pesées de l'éprouvette témoin donnent, par différence, la valeur de l'évaporation : celle-ci, toujours très faible, est de l'ordre de grandeur de 1/10 de cm^3 par 24 heures à 15° (Tableau III).

Une autre erreur de mesure est celle commise sur la lecture proprement dite du volume de l'écoulement recueilli pendant 24 heures. Au début des essais, les écoulements étant assez importants (de l'ordre de 100 cm^3 par 24 heures en moyenne) sont mesurés dans des éprouvettes graduées de 5 en 5 cm^3. A mesure que ces écoulements deviennent plus faibles (à partir de 50 cm^3) ils sont mesurés dans des éprouvettes graduées de 1 en 1 cm^3.

Toutes les lectures sont faites en partant de la partie inférieure du ménisque formé par l'eau dans une éprouvette graduée. L'erreur absolue commise sur une lecture faite, dans ces conditions, avec une éprouvette graduée de 5 en 5 cm^3 est de l'ordre de grandeur de 2 cm^3, soit une erreur relative maximum de 4%.

TABLEAU III.
Evaporation par 24 H.

cm3	température au moment de la lecture
0,2	16°
0,2	17°
0,1	15°
0,1	16°
0,1	15°
0,1	13°
0,1	16°
0,1	18°
0,1	21°
0,1	20°
0,1	22°
0	21°
0,1	22°

TABLEAU IV

Heures	cm3
13.45	0
14.00	2,6
15	2,4
30	2,1
45	2,1
15.00	2,2
15	1,7
30	2,4
45	2,5
16.00	2,1
15	1,7
30	1,7
45	2
17.00	1,7

Avec une éprouvette graduée de 1 en 1 cm³, cette erreur est de l'ordre de 1/2 cm³ en valeur absolue.

L'erreur due au calibrage des éprouvettes graduées est négligeable.

Enfin, une dernière erreur, dont la cause dépend essentiellement de l'appareillage, est susceptible de fausser les mesures.

En effet, après avoir traversé le béton les écoulements d'eau sont rassemblés dans un entonnoir avant d'être mesurés à l'aide d'une éprouvette graduée. Au moment d'une lecture il arrive que des gouttes d'eau restent dans l'entonnoir pour n'être recueillies qu'une fois la lecture faite. Le tableau IV donne, par exemple, les écoulements recueillis dans une éprouvette toutes les 15 minutes : la sensible oscillation des valeurs obtenues permet de se rendre compte de l'erreur ainsi commise. Néanmoins, en ayant soin de faire les lectures successives après des intervalles de temps égaux et d'une certaine durée (24 heures dans nos expériences), on peut admettre que la quantité d'eau ainsi retenue dans l'entonnoir est sensiblement la même d'une lecture à l'autre : l'erreur commise sur une lecture se retrouvant sur la suivante, les résultats obtenus peuvent donc être considérés comme comparables entre eux.

Nous n'avons pas tenu compte de toutes ces erreurs de mesure. Les différentes études expérimentales sont faites en partant des valeurs trouvées d'après les lectures du volume des écoulements successivement recueillis.

RESUME.

La perméabilité d'un béton peut se définir par le volume d'eau écoulé pendant un temps donné. Sa mesure se fait à l'aide d'un dispositif soumettant l'eau à une pression constante pendant toute la durée de la détermination et permettant de recueillir les écoulements produits.

Après avoir décrit la batterie de perméabilité, nous avons indiqué les principales erreurs commises et leurs ordres de grandeur. Ces erreurs n'étant pas, en général, systématiques, nous n'avons pas fait de corrections de mesure.

CHAPITRE III.

INFLUENCE DU TEMPS SUR LA PERMEABILITE

Le chapitre II a montré que la perméabilité d'un béton peut se définir et se mesurer par le volume de l'écoulement d'eau recueilli pendant un intervalle de temps donné.

Le volume des écoulements diminuant avec le temps, la perméabilité ne peut se déterminer ainsi d'une manière absolue. On serait contraint, comme pour la résistance à la compression avant les recherches d'ABRAMS, FERET et BOLOMEY, de ne la définir que par sa mesure à 7 jours, 28 jours et 3 mois.

Le but de ce chapitre est de mettre en évidence que la perméabilité d'un béton peut être définie indépendamment du temps, moyennant certaines conditions expérimentales. Ces conditions sont facilement réalisables et consistent, en particulier, à exécuter toutes les mesures sous des pressions rigoureusement constantes et à faire les lectures du volume d'eau écoulé après des intervalles de temps réguliers, par exemple de 24 heures comme dans toutes nos expériences.

Nous avons choisi comme fonction le débit horaire de l'écoulement, en faisant le quotient de la valeur numérique du volume obtenu par l'intervalle de temps séparant deux lectures consécutives. Le débit horaire que nous considérons est donc un débit horaire moyen.

La variation de la perméabilité en fonction du temps peut, dans ces conditions, se représenter graphiquement en portant les temps en abscisses et les valeurs du débit horaire successivement obtenu en ordonnées. Le débit considéré étant un débit moyen,

le graphique se tracera en portant les différentes ordonnées au droit des milieux des segments représentant, en abscisses, les intervalles de temps séparant deux lectures consécutives.

Sur un tel graphique, l'origine des temps coïncide avec l'instant de la mise en pression de l'eau dans le pot de perméabilité. C'est, en effet, à partir de cet instant que la masse du béton commence à s'imprégner. Comme les premières filtrations ayant traversé le béton de part en part ne sont recueillies qu'après un certain temps à partir de la mise en pression, le graphique ne passe pas par l'origine. Cet intervalle de temps pendant lequel aucun écoulement ne se produit, est variable suivant la composition du béton et surtout suivant l'intensité de la pression de l'eau au contact du béton. Les valeurs du débit horaire dépendent également de ces deux facteurs. Nous étudierons dans le chapitre suivant l'influence particulière de la pression sur ces premiers écoulements.

Après avoir tracé les graphiques représentatifs de la variation de la perméabilité de différents échantillons de béton soumis à une pression constante pendant toute la durée d'un essai, nous avons constaté que l'allure générale présentée par les graphiques correspondants dépend essentiellement de la pression. Toutefois, pour une même pression constante, les graphiques présentent toujours la même allure générale : l'étude de l'influence du temps sur la perméabilité peut donc être faite à partir d'un graphique expérimental quelconque.

La durée des différentes expériences permettant la mesure de la perméabilité a été en moyenne de 30 jours et au maximum de 3 mois. Nous avons fait cette étude sous une pression de 8 kg. par cm^2, pression maximum que l'on peut réaliser à l'aide de la batterie de perméabilité dont nous disposions. Cette pression, relativement élevée, présente l'avantage de permettre une facile interprétation des graphiques. Nous donnerons dans le chapitre suivant

les résultats obtenus en utilisant des pressions plus faibles de l'ordre de 2, 4 et 6 kg. par cm², en montrant l'influence d'une augmentation de pression sur la valeur numérique du débit horaire successivement obtenu.

GRAPHIQUE EXPERIMENTAL.

Un graphique expérimental, tel que celui que nous reproduisons dans la figure VII, peut être considéré comme comportant deux parties nettement distinctes.

La première est relative à l'établissement de la pression d'eau à laquelle le béton est soumis. Les débits vont en croissant jusqu'à atteindre une valeur maximum. Par exemple pour le graphique de la fig. VII qui correspond à un béton de la série G_1 (2) sous une pression constante de 8 kg. par cm², le débit maximum est atteint le quatrième jour de la mise en pression. Cette période de perturbation et d'établissement de régime, pendant laquelle les premiers écoulements d'eau se produisent à travers la masse du béton est donc relativement courte.

La seconde partie du graphique commence sensiblement à partir du temps correspondant au débit maximum et s'étend jusqu'à un temps quelconque. Nous interprèterons uniquement, dans ce chapitre, cette seconde partie de beaucoup la plus importante et la plus intéressante au point de vue pratique puisqu'elle renseigne sur les variations de la perméabilité d'une masse de béton complètement imprégnée.

Nous désignerons par q_1 et q_2 la valeur numérique respective de deux débits horaires moyens obtenus après des temps successifs t_1 et t_2 comptés à partir de l'instant de la mise en pression initiale. La seconde partie du graphique est alors caractérisée par le fait que les différents rapports :

(2) Voir chapitre I, tableau I.

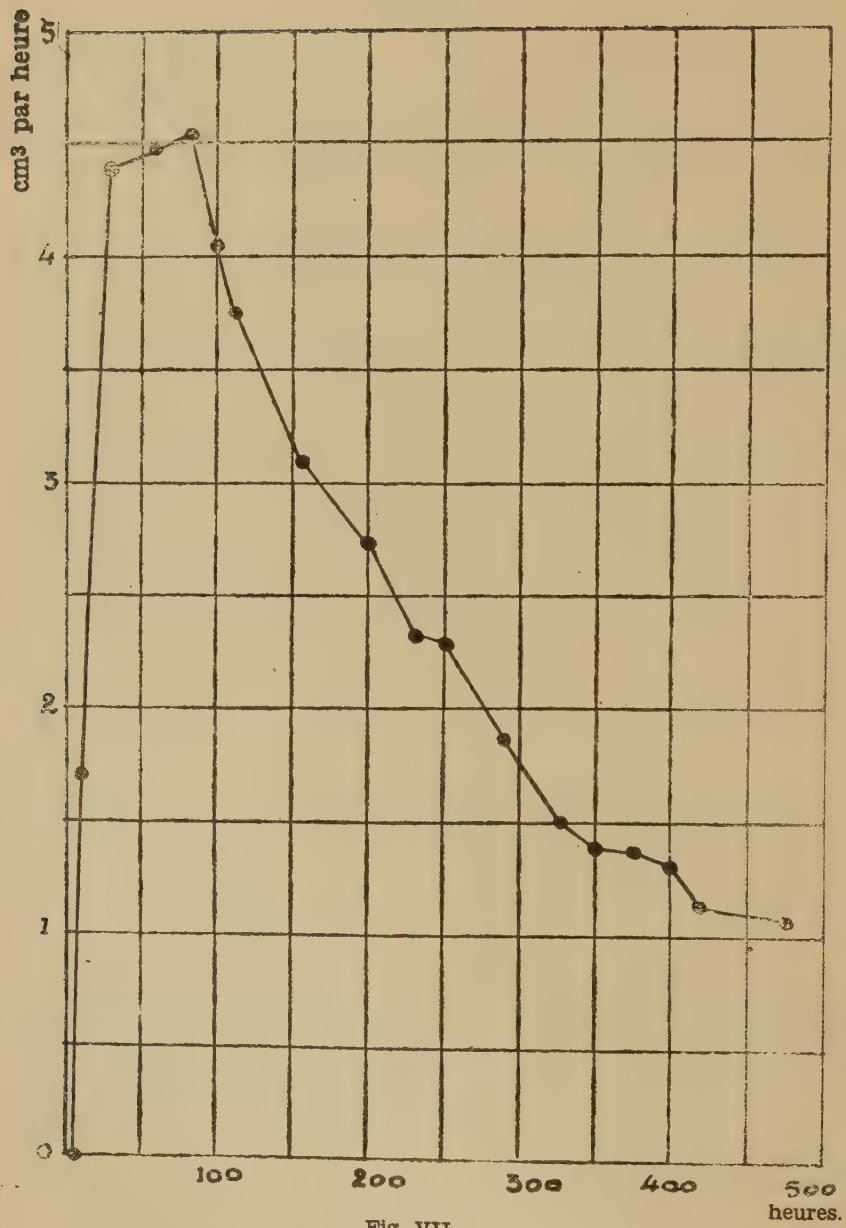


Fig. VII
Béton : série G_1 — Pression : 8 kg./cm² — Age : 36 jours

TABLEAU V.

Béton : série G_1 — Pression : 8 kg./cm² — Age : 36 jours.

Jours	Diff. d'heures	Temps	Moyenne des diff. d'heures	Temps moyens	Volumes écoulés totaux	Volumes écoulés partiels	Débits moyens	K² moyens
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
6	55	144			0			
			11,5	155,5		72	3,13	487
7	23	167			72			
			12	179		72	3,00	537
8	24	191			144			
			12,5	203,5		67	2,68	545
9	25	216			211			
			12.	228		56	2,33	531
10	24	240			267			
			12	252		54	2,25	567
11	24	264			321			
12	--	---	24,5	288,5		92	1,87	539
13	49	313			413			
			11	324		33	1,50	486
14	22	335			446			
			12,5	347,5		35	1,40	486
15	25	360			481			
			12	372		33	1,37	510
16	24	384			514			
			12	396		32	1,33	527
17	24	408			546			
			11,5	419,5		27	1,17	491
18	23	431			573			

$t_1 = 144$; $t_2 = 431$; $(V)_{t_1}^{t_2} = 573$; $K^2 = 523$.

TABLEAU VI.

Béton : série G_2 - - Pression : 8 kg./cm² — Age : 30 jours

Jours (1)	Diff. d'heures (2)	Temps (3)	Moyenne des diff. d'heures (4)	Temps moyens (5)	Volumes écoulés totaux (6)	Volumes écoulés partiels (7)	Débits moyens (8)	K^2 moyens (9)
30	24	694			0			
			12	706		18	0,750	529
31	24	718			18			
			12	730		16,5	0,689	503
32	24	742			34,5			
			12	754		15,5	0,645	486
33	24	766			50			
34	--		24	790		30	0,625	494
35	48	814			80			
			12	826		14,5	0,604	499
36	24	838			94,5			
			12	850		14	0,583	496
37	24	862			108,5			
			12	874		13,5	0,562	491
38	24	886			122			
			12	898		13	0,541	486
39	24	910			135			
			12	922		13	0,541	499
40	24	934			148			
			12	946		12,5	0,520	492
41	24	958			160,5			
			12	970		11,5	0,479	465
42	24	982			172			
			12	994		11	0,458	455
43	24	1006			183			
			12	1018		10	0,416	423
44	24	1030			193			
			12	1042		12	0,500	521
45	24	1054			205			
			12	1066		10	0,416	443
46	24	1078			215			
			12	1090		10	0,416	453
47	24	1102			225			

$t_1 = 694$; $t_2 = 1102$; $(V)_{t_1}^{t_2} = 225$; $K^2 = 487$.

$$\frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1}$$

sont constamment négatifs : la perméabilite est une fonction décroissante du temps.

D'après les résultats obtenus dans toute une série d'expériences nous avons observé que, pratiquement à partir du temps correspondant au maximum du débit, les égalités suivantes sont très sensiblement vérifiées :

$$q_1 \,.\, t_1 = q_2 \,.\, t_2 = \ldots\ldots\ldots\ldots = q \,.\, t = K^2 \qquad (1)$$

Cette constatation étant uniquement expérimentale, nous reproduisons dans les tableaux V et VI quelques valeurs des débits horaires moyens obtenus après des temps successifs ainsi que celles des produits K^2 correspondants. Le tableau V, en particulier est relatif à l'essai dont le graphique est représenté par la fig. VII.

On peut remarquer, d'après ces tableaux, que les valeurs numériques des différents produits K^2 oscillent autour d'une valeur moyenne. Cette valeur correspondrait à la constante de l'hyperbole équilatère représentant la variation du débit instantané en fonction du temps.

Le débit instantané que nous considérons est essentiellement fictif : ce serait , en effet, le débit obtenu, à un instant quelconque, sur la surface de l'échantillon de béton qui est directement opposée à celle au contact de l'eau sous pression. Ce débit n'est donc pas mesurable directement.

Si nous désignons par Q un débit fictif instantané quelconque, la seconde partie du graphique semble donc se confondre avec la branche de l'hyperbole équilatère (fig. VIII) ayant pour asymptotes les deux axes des coordonnées et représentée analytiquement par l'équation :

$$Q \,.\, t = K^2 \qquad (2)$$

A chaque échantillon de béton correspond la même relation simple entre le débit des écoulements et la durée de la pression. La notion du débit fictif instantané se trouve donc justifiée puisqu'elle permet l'interprétation des résultats expérimentaux.

La constante K^2 ainsi obtenue semble présenter un intérêt particulier étant donné qu'elle est indépendante du temps. Elle peut être considérée, en outre, comme un coefficient spécifique de la perméabilité d'un échantillon de béton parfaitement défini et soumis à une pression constante dans des conditions expérimentales déterminées.

On peut constater que ce coefficient de perméabilité varie avec la pression et la constitution du béton. Sa connaissance permettrait donc d'étudier l'influence des autres facteurs agissant sur la perméabilité.

Ce coefficient, ainsi défini, peut être obtenu à partir d'un temps quelconque choisi arbitrairement après le temps correspon-

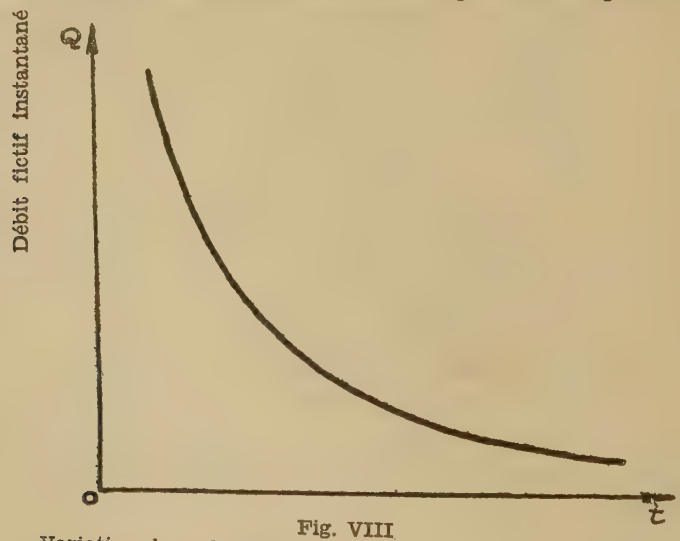


Fig. VIII
Variation hyperbolique du débit en fonction du temps

dant au maximum du débit. La valeur numérique ainsi trouvée n'est pas rigoureusement exacte puisque les débits horaires ne sont obtenus que par des mesures soumises, comme nous l'avons vu dans le chapitre II, à certaines erreurs de lecture.

Pour augmenter la précision on peut admettre, pour valeur numérique, la moyenne des valeurs obtenues par différentes lectures consécutives. Il nous semble préférable de déterminer directement ce coefficient de la manière suivante.

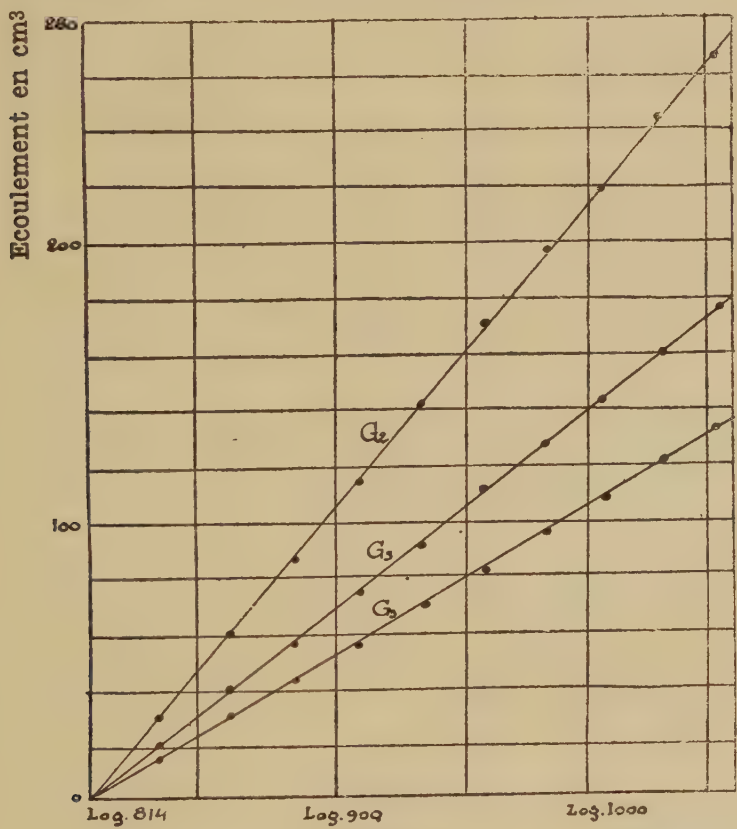


Fig. IX

Béton : série G_3 et G_2 — Pression : 8 kg./cm² — Age : Temps en heures { G_3 : 36 jours ; G_2 : 90 jours }

RECHERCHE PRATIQUE DU COEFFICIENT DE PERMEABILITE (3).

En faisant intervenir le volume d'eau écoulé pendant un temps 'nfiniment petit, on obtient une relation susceptible de servir de point de départ à une méthode pratique permettant de connaître rapidement la valeur numérique du coefficient spécifique de la perméabilité d'un béton soumis à une pression constante.

En effet si nous désignons par dV le volume d'eau écoulé pendant un intervalle de temps dt, nous avons par définition du débit instantané :

$$dV = Q \cdot dt \qquad (3)$$

En portant la valeur du débit, tirée de la relation (2), dans cette dernière relation, il vient :

$$dV = K^2 \cdot \frac{dt}{t} \qquad (4)$$

La relation (4) permet de connaître à un instant quelconque, pris arbitrairement après le temps correspondant au débit maximum, la valeur numérique du coefficient de perméabilité en fonction de l'écoulement produit pendant l'intervalle de temps infiniment petit dt.

L'intégration de l'équation (4) entre deux temps t_1 et t_2 donne :

$$(V)_{t_1}^{t_2} = K^2 \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{t} = K^2 \ (\text{Log. } t)_{t_1}^{t_2} \qquad (5)$$

(3) Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences : t. 203, p. 1351, 14 déc. 1936.

Le volume de l'écoulement d'eau recueilli pendant l'intervalle de temps t_2 - t_1 est une fonction linéaire du logarithme de ce temps compté à partir de la mise en pression.

Or, le graphique construit en portant les logarithmes des différents intervalles de temps en abscisses et, en ordonnées. les valeurs numériques des volumes correspondants, est effecti-

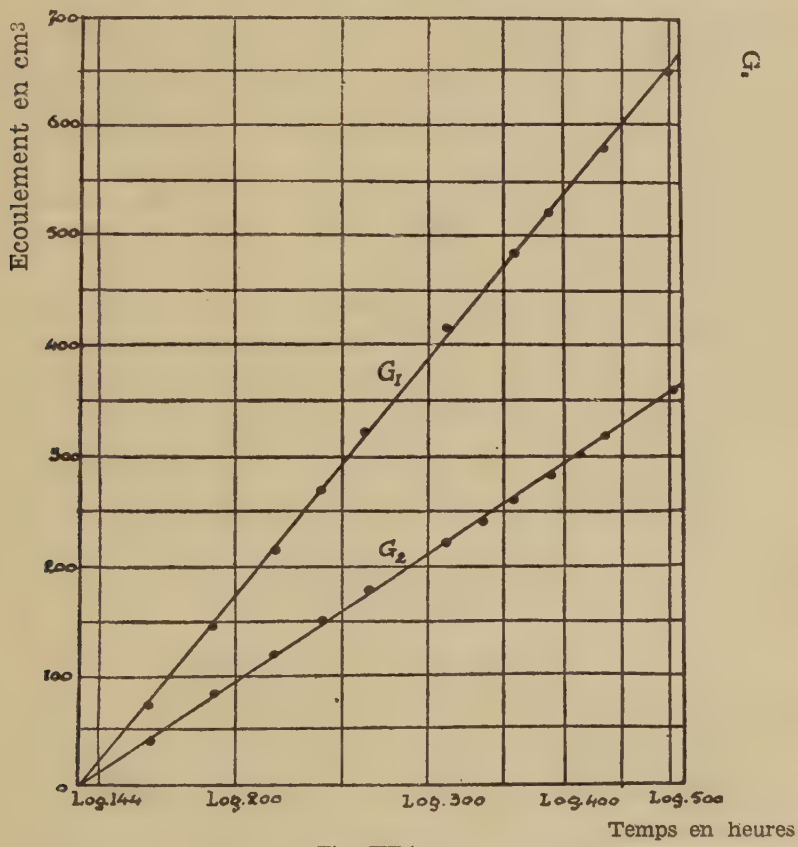


Fig. IXbis

Béton : série G_1 et G_2 — Pression : 8 kg./cm² — Age : 36 jours

vement rectiligne avec un haut degré de précision. Nous reproduisons (fig. IX) différents graphiques tracés dans ce système de coordonnées et correspondants à des échantillons de béton des séries G_1, G_2 et G_3 (4). Le graphique hyperbolique précédent se trouve donc être confirmé puisque la relation (5) est une conséquence de la relation (2).

L'intérêt de la relation (5) est de ne pas faire intervenir le débit horaire moyen, ce qui diminue les erreurs de mesure. D'autre part, le graphique rectiligne se construit aisément dès que le maximum du débit de l'écoulement est atteint. En effet, deux points suffisent pour le construire, un de ces points pouvant être choisi pour origine des volumes écoulés et des logarithmes des temps. Pour avoir un second point, il suffira de recueillir les écoulements dans une éprouvette graduée et, de mesurer un volume de l'ordre de grandeur du litre de manière à diminuer l'erreur relative commise sur la lecture. La droite représentative des variations du volume de l'écoulement en fonction du logarithme du temps est alors immédiatement tracée en joignant le second point obtenu à l'origine du nouveau graphique. La construction ne demande donc qu'une seule mesure de volume (fig. X). Le coefficient de perméabilité est représenté graphiquement par le coefficient angulaire de la droite. Il peut être également déterminé numériquement en prenant les logarithmes de la relation (5).

$$\log. K2 = \log. (V)_{t_1}^{t_2} + \text{colog.} (\text{Log. } t)_{t_1}^{t_2} \qquad (6)$$

Ce coefficient, égal au produit d'un débit par un temps, a la dimension d'un volume : il peut se représenter par le nombre entier se rapprochant le plus de la valeur théorique trouvée. A la

(4) Voir chapitre I, tableau I.

suite des tableaux V et VI nous avons calculé les deux coefficients correspondant à ces deux essais en spécifiant le volume d'eau écoulé pendant la durée de la mesure.

L'étude expérimentale de la perméabilité étant faite en partant d'un débit horaire de l'ordre de grandeur du centimètre-cube, nous exprimons le coefficient spécifique en « centimètres-cubes ».

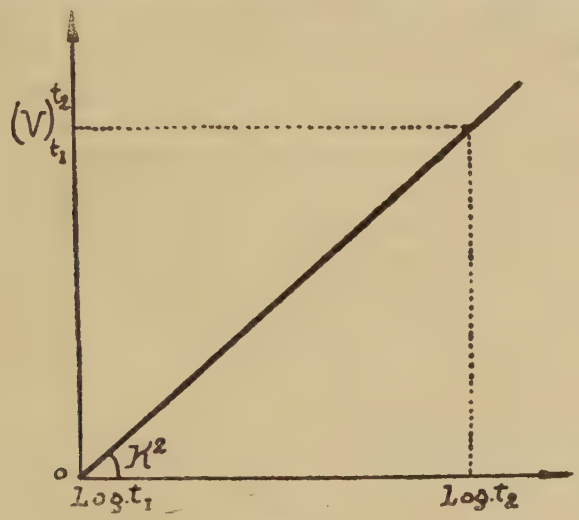


Fig. X
Variation du volume des écoulements
en fonction du logarithme du temps.

PERMEABILITE D'UN BETON.

La mesure de la perméabilité d'un béton se faisant sur un échantillon quelconque , il reste à savoir si le coefficient spécifique d'un échantillon déterminé est le même quel que soit l'échantillon, autrement dit si ce coefficient n'est fonction, pour une pression donnée, que de la composition, dosage, conservation et mode de serrage du béton.

On constate, expérimentalement, que des échantillons provenant de la même gâchée et de même conservation ne sont pas représentés par le même coefficient de perméabilité malgré toutes les précautions prises consistant, par exemple, à couler alternativement le béton dans les différents moules et à pilonner les cubes d'une manière uniforme.

D'autre part, des échantillons identiques, soumis à des essais de compression, donnent la même résistance à une erreur de 3% près environ. Ces échantillons ont donc pratiquement la même composition et le même dosage.

La différence de perméabilité ne peut alors s'expliquer que par le fait que ces échantillons n'ont pas rigoureusement la même structure interne. En particulier le nombre et le diamètre des canaux du réseau capillaire existant dans la structure des différentes masses varient d'un échantillon à l'autre.

Le coefficient que nous avons déterminé est donc spécifique de la structure du réseau capillaire.

Cette hypothèse se justifie.

En effet, la face d'un échantillon de béton, directement opposée à celle au contact de l'eau sous pression, ne s'imprègne pas uniformément au début d'une expérience. En particulier des suintements commencent par se produire en certains points de la surface avant que toute celle-ci ne s'humidifie entièrement. La perméabilité des différentes masses élémentaires, dont l'ensemble constitue l'échantillon cubique, n'est donc pas la même, et à chacune d'elles correspond un coefficient spécifique.

De même nous avons vu que le fait d'avoir été conservé sous une masse d'eau pendant la prise contribuait à améliorer l'étanchéité d'un béton dans de très grandes proportions. Dans le chapitre I nous avons rappelé que la conservation à l'eau éait accompagnée d'un « gonflement ». Ce phénomène physique , qui se produit dans

la masse même, doit donc agir effectivement sur celle-ci en diminuant le diamètre des canaux capillaires, ce qui permet d'expliquer la diminution de la perméabilité.

En définitive, pour déterminer la perméabilité d'un béton ayant un dosage et une granulométrie donnés, il faudra prendre, comme coefficient spécifique, la moyenne arithmétique des coefficients relatifs à plusieurs échantillons de ce même béton. Puis, en faisant varier d'une part le dosage en ciment, et d'autre part la composition granulométrique, il est possible d'établir les variations du coefficient spécifique des bétons correspondants. Cette étude systématique demande des essais très nombreux, et la recherche du béton dont le coefficient spécifique de la perméabilité, pour une pression donnée, est le plus faible dépasse largement le cadre de nos expériences.

RESUME.

La conclusion de cette étude expérimentale de l'influence du temps sur la perméabilité d'un béton est la suivante : la perméabilité peut se caractériser par un coefficient indépendant du temps. Ce coefficient se détermine rapidement par la mesure du volume de l'écoulement obtenu pendant un temps donné à partir du moment où le maximum du débit est atteint.

Nous avons constaté que, avec les bétons utilisés sous une pression constante de 8 kg. par cm^2, le débit maximum est largement dépassé après une filtration continue d'une durée d'une semaine environ. Comme nous le verrons, cette durée de filtration augmente quand l'intensité de la pression devient plus faible.

La connaissance du coefficient spécifique de la perméabilité d'un béton sous pression constante permet l'étude de l'influence

des autres facteurs agissant sur la perméabilité. En particulier il est possible de déterminer, dans certaines conditions que nous préciserons, la variation de ce coéfficient en fonction de la pression : c'est le sujet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LA PERMEABILITE

La pression est un facteur important des écoulements. Si la valeur de la pression n'est pas rigoureusement constante pendant toute la durée de la mesure, on peut constater que les débits horaires moyens, obtenus pendant ce temps, sont supérieurs ou inférieurs à leurs valeurs théoriques suivant qu'il y a eu augmentation ou diminution de la pression : le graphique représentatif devient discontinu. Avant d'étudier la variation du coéfficient spécifique de la perméabilité en fonction de la pression, nous allons examiner l'influence de celle-ci sur les graphiques correspondants.

En admettant que la pression reste constante, sa valeur influe sur l'importance des écoulements. Nous avons montré dans le chapitre précédent, que chaque graphique expérimental tracé en portant en ordonnées les valeurs successives du débit et, en abscisses les temps correspondants, peut être considéré comme comportant deux parties nettement distinctes. Nous avons établi que la seconde partie d'un graphique quelconque se confond très sensiblement avec une branche d'hyperbole équilatère. Son allure générale est donc indépendante de la pression et de la composition du béton : seule la valeur numérique du coéfficient spécifique que nous avons défini est fonction de ces deux facteurs.

L'allure générale de la première partie d'un graphique semble par contre, dépendre de la pression. C'est cette première partie que nous allons étudier maintenant.

Le début du phénomène peut être considéré comme correspondant à une période de perturbation et d'établissement de régime pendant laquelle le béton commence à s'imprégner d'eau, puis se laisse traverser d'une manière continue par les filtrations. Nous avons fait remarquer que des échantillons de béton provenant de la même gâchée et soumis à la même pression constante, n'ont pas les mêmes graphiques de perméabilité : la comparaison des premières parties des graphiques, obtenus en soumettant des bétons de même composition à des pressions différentes, est donc illusoire du point de vue quantitatif, et seule l'étude qualitative de l'influence de la pression sur leur allure générale est possible.

Nous nous contenterons, par conséquent, d'exposer uniquement les résultats expérimentaux que nous avons obtenus dans ces conditions.

INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LES PREMIERS ECOULEMENTS.

On peut constater expérimentalement que la période de perturbation et d'établissement de régime est d'autant plus courte que la pression est plus élevée. Ce fait est illustré par la figure XI dans laquelle sont représentés les graphiques de deux échantillons d'un béton de la série G_2 (1), de même conservation et soumis à des pressions respectivement égales à 2 et 8 kg. par cm².

Ces graphiques permettent de remarquer en particulier que pour une pression de l'ordre de 8 kg. par cm², le graphique correspondant passe franchement par un maximum, le raccorde-

(1) Voir chapitre I, tableau I.

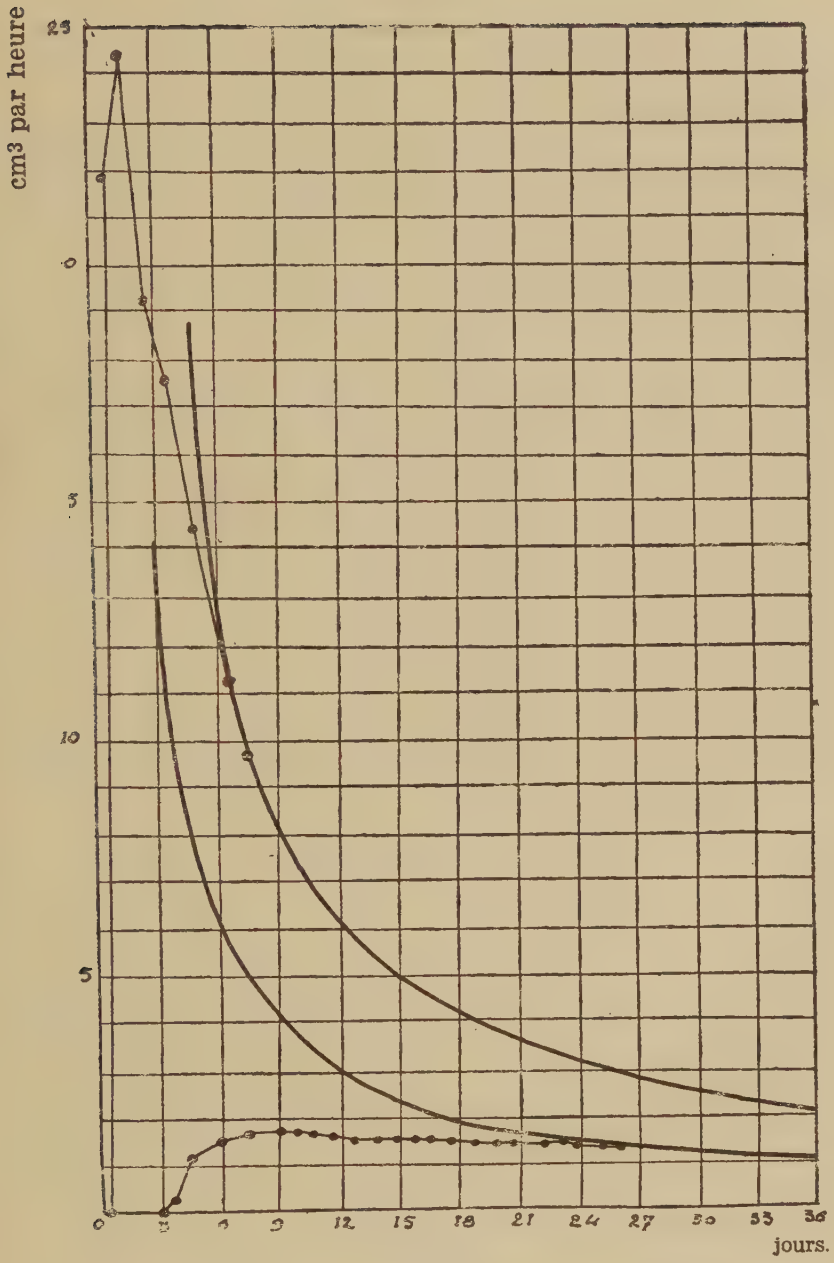


Fig. XI

Etude qualitative de l'influence de la pression sur la perméabilité.

ment de la première partie du graphique avec l'hyperbole équilatère théorique se faisant très rapidement. Au contraire pour des pressions faibles de l'ordre de 2 kg. par cm², le maximum n'est pas nettement déterminé. Les débits conservent pratiquement la même valeur pendant un certain temps. Le raccordement avec la deuxième partie du graphique de forme hyperbolique se fait seulement ensuite.

La comparaison de ces deux graphiques permet de dire que le raccordement se fait d'autant plus rapidement que la durée d'étanchéité initiale du béton est plus petite : cette remarque est d'ailleurs absolument générale pour toutes nos expériences. De plus l'abscisse de ce raccordement semblerait être parfaitement déterminée. Comme nous le montrerons par la suite, elle correspondrait à l'instant à partir duquel la pression de l'eau s'est stabilisée à l'intérieur de la masse du béton.

Des expériences successives, faites sous des pressions intermédiaires, ont montré que les premières parties des graphiques obtenus sous 4 et 6 kg. par cm² par exemple se déforment suivant la pression : la valeur du maximum est d'autant plus grande et rapidement atteinte que la pression devient plus élevée.

La première partie d'un graphique est donc essentiellement fonction de la pression. Elle a, en outre, une durée limitée, le phénomène de la perméabilité se traduisant ensuite et d'une manière continue par un écoulement suivant pratiquement une loi hyperbolique en fonction du temps. Dans ces conditions, on peut considérer la période de perturbation comme s'étendant depuis l'instant de la mise en pression initiale jusqu'à celui qui correspond au maximum du débit. La partie du graphique comprise entre le maximum et le raccordement avec l'hyperbole théorique correspondrait à une période transitoire entre celle de perturbation initiale due à la mise en pression et celle du phénomène proprement dit de la perméabilité.

VARIATION DU COEFFICIENT SPECIFIQUE EN FONCTION DE LA PRESSION

Etant donné que, malgré toutes les précautions prises, deux échantillons du même béton n'ont pas rigoureusement le même coéfficient de perméabilité, les différents essais sous pressions variables sont poursuivis sur le même échantillon.

Nous avons vu que, pour une pression constante, la variation de la perméabilité en fonction du temps était hyperbolique, l'asymptote verticale de cette hyperbole équilatère étant définie sur l'axe du temps par l'instant de la mise en pression initiale.

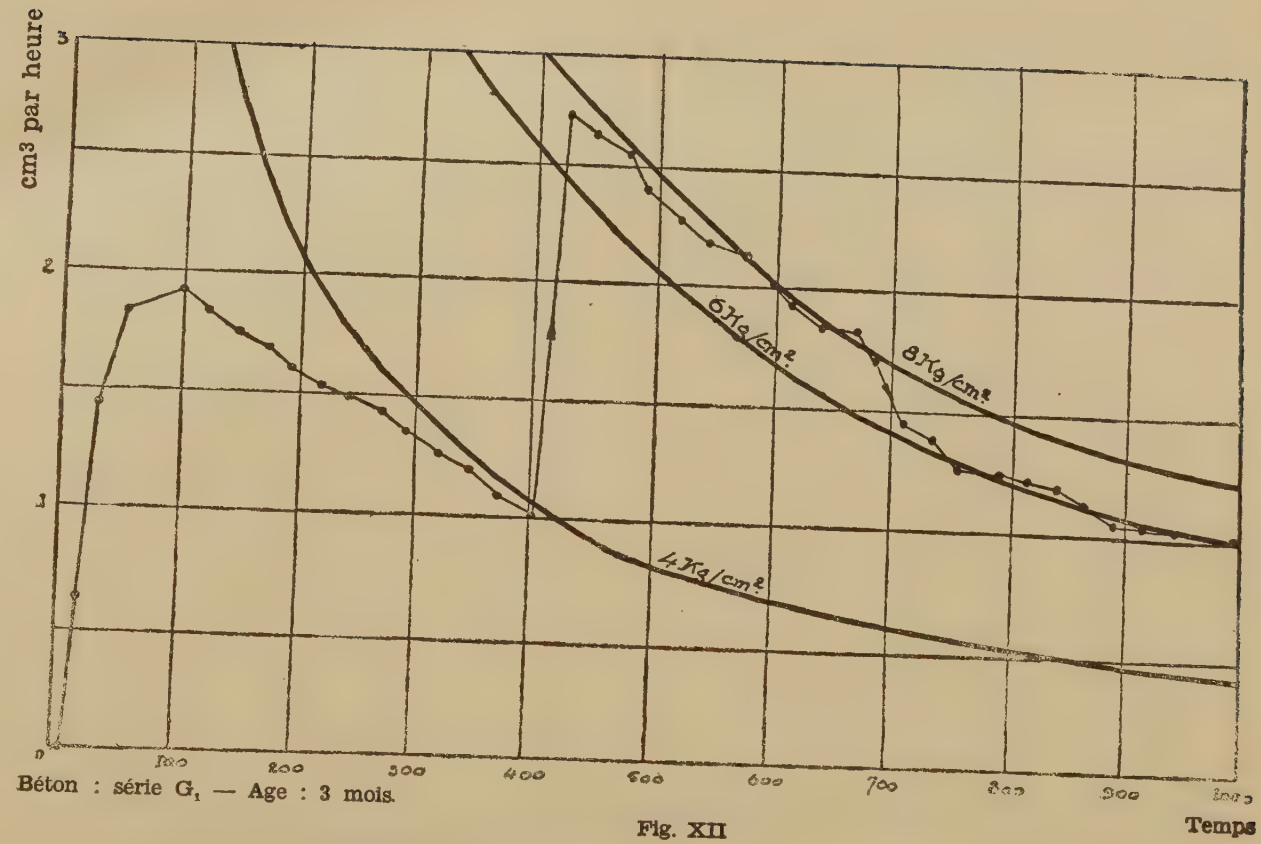
Si, à un instant donné, la pression vient à varier, cette augmentation ou diminution de pression change l'équilibre établi et amène une perturbation du régime. En effet, on peut constater expérimentalement que toute variation de pression entraîne une variation du coefficient spécifique dans le même sens. En désignant par dp cette variation de pression, la variation $d(K^2)$ du coefficient sera donc telle que l'inégalité suivante :

$$dp \cdot d(K^2) > 0 \qquad (7)$$

soit satisfaite.

Le nouveau coefficient spécifique calculé correspond à une branche d'hyperbole équilatère ayant la même origine que l'hyperbole précédente. Par conséquent, une variation de pression déplace la « perméabilité » sur une famille d'hyperboles équilatères dont l'asymptote verticale fixe coïncide sur l'axe du temps avec l'instant à partir duquel le béton a subi la première pression d'eau (fig. XII).

Toutefois l'expérience montre que si, partant d'une pression



Béton : série G_1 — Age : 3 mois.

Fig. XII

Variation du coéfficient spécifique en fonction de la pression.

p_1, le béton est successivement soumis à une pression p_2 inférieure à p_1, puis à une pression p_3 égale ou même supérieure à la pression initiale (par exemple : p_1 = 6 kg. par cm², p_2 = 4 kg. par cm², p_3 = 8 kg. par cm²), les coefficients spécifiques de la perméabilité: $(K^2)_{p_1}$, $(K^2)_{p_2}$, $(K^2)_{p_3}$, correspondant à chacune de ces pressions sont tels que :

$$(K^2)_{p_1} > (K^2)_{p_3} > (K^2)_{p_2} \qquad (8)$$

De même, si la pression intermédiaire p_2 est respectivement supérieure aux pressions initiale p_1 et finale p_3, on a l'inégalité suivante entre les coéfficients :

$$(K^2)_{p_2} > (K^2)_{p_3} > (K^2)_{p_1} \qquad (9)$$

Nous avons constaté ces faits dans de nombreuses expériences. Il en résulte que la perméabilité d'un béton n'est pas une fonction « uniforme » de la pression : à chacune des valeurs de la pression correspond une infinité de valeurs du coefficient spécifique qui dépendent des valeurs antérieures prises par cette pression.

On peut obtenir des résultats systématiques en opérant par pressions successivement croissantes de manière à produire dans la masse du béton une perturbation toujours dans le même sens.

Les essais effectués dans ce but ont été faits sous des pressions variant de 2 kg. par cm² à 4, 6 et 8 kg. par cm². Chacune de ces pressions successives a été maintenue sensiblement pendant le même intervalle de temps.

Les tableaux VII, VIII et IX reproduisent les différentes valeurs des débits horaires moyens ainsi que celle des coéfficients spécifiques correspondant à chacune de ces pressions. Les mesures ont été exécutées sur deux échantillons d'un béton de la série G_3 (2).

---

(2) Voir chapitre I, tableau I.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Pression en kg./cm²	Coefficient de perméabilité en cm³	
	Echantillons :	
	N° 3	N° 4
2	1.050	550
4	2.144	1.062
6	3.339	1.665
8	4.315	2.243

La perméabilité est donc sensiblement une fonction linéaire de la pression pour une valeur de celle-ci comprise entre 0 et 8 kg. par cm² (fig. XIII). Sa variation peut se représenter sous la forme :

$$\frac{K^2}{p} = C^{te} \qquad (10)$$

Une seconde série d'expériences a consisté à continuer l'essai précédent en opérant cette fois par pressions successivement décroissantes : les valeurs respectives des nouveaux coefficients spécifiques, étaient, dans tous les cas, toujours supérieures aux valeurs correspondantes obtenues pendant les premiers essais. Ce résultat était d'ailleurs prévisible à l'aide de l'inégalité (9).

Les inégalités (8) et (9) ainsi que la relation (10) mettent nettement en évidence le rôle de la pression pendant le phénomène de la preméabilité d'un béton soumis à une pression variable. L'inégalité (8) semble présenter par elle-même un intérêt particulier. En effet, nous avons constaté qu'une interruption de la pression pendant un essai entraînait toujours, par la suite, une

diminution importante de la valeur des écoulements : cette remarque semble susceptible de pouvoir s'appliquer pratiquement.

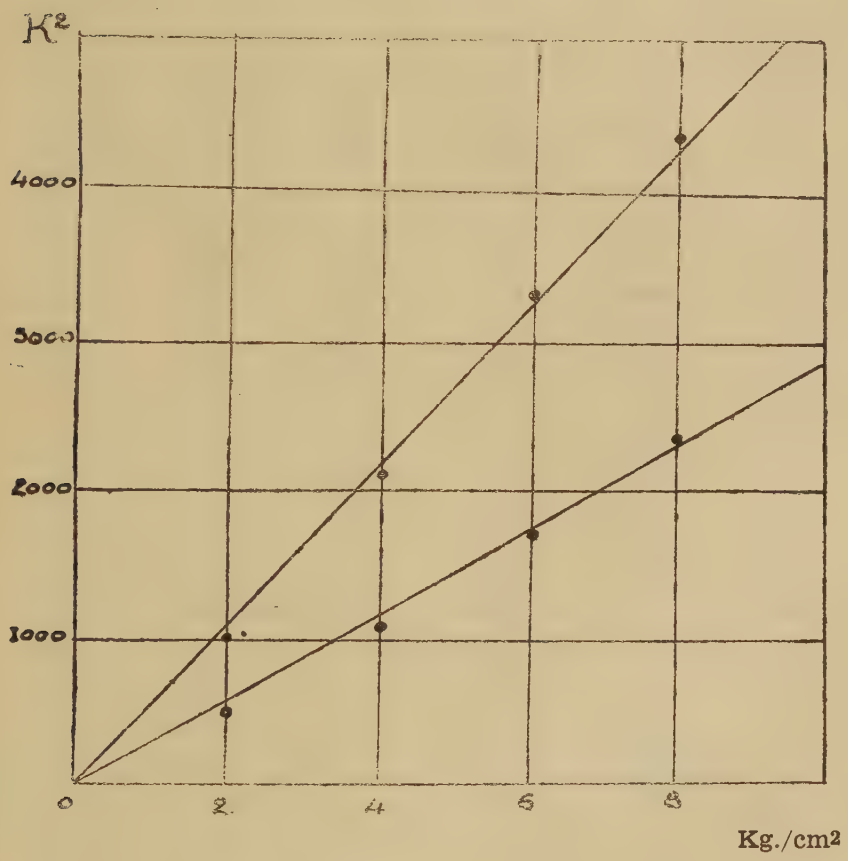


Fig. XIII

Variation de la perméabilité par pressions croissantes.

TABLEAU VII.

Béton : Série G_3, N° 4 — Pression : 4 kg./cm² — Age : 9 mois

Jours (1)	Temps moyens (2)	Volumes écoulés totaux (3)	Volumes écoulés partiels (4)	Débits moyens (5)	K^2 moyens (6)
28	(672)	.....	.....	.....	.....
29	684	36,5	36,5	1,520	1040
30	708	73	36,5	1,520	1076
31	732	108,5	35,5	1,479	1083
32	756	143	34,5	1,437	1086
33	780	177	34	1,416	1084
34	.....	.....	.....	.....	.....
35	816	237,5	60,5	1,260	1028
36	852	267	29,5	1,229	1047
37	876	295,5	28,5	1,187	1040
38	900	325,5	30	1,250	1125
39	924	354,5	29	1,208	1116
40	948	382,5	28	1,166	1105
41	.....	.....	.....	.....	.....
42	984 (1008)	42 ,5	47	0,979	963

$$t_1 = 672 \; ; \quad t_2 = 1008 \; ; \quad (V)_{t_1}^{t_2} = 429{,}5 \; ; \quad K^2 = 1062 \, .$$

TABLEAU VIII.

Béton : série G_3, N° 4 — Pression : 6 kg./cm² — Age : 9 mois

Jours (1)	Temps moyens (2)	Volumes écoulés totaux (3)	Volumes écoulés partiels (4)	Débits moyens (5)	K^2 moyens (6)
43	(1032)	.....	.....	.....	.....
44	1044	37	37	1,541	1609
45	1068	72	35	1.458	1558
46	1092	108	36	1,500	1638
47	1116	143	35	1,458	1627
48	.....	.....	.....	.....	.....
49	1152	211	68	1,416	1631
50	1188	246	35	1,458	1732
51	1212	279	33	1,375	1666
52	1236	313	34	1,416	1750
53	1360	347	34	1,416	1784
54	1284	379,5	32,5	1,354	1739
55	.....	.....	.....	.....	.....
56	1320	439,5	60	1,250	1650
	(1344)				

$$t_1 = 1032 \; ; \quad t_2 = 1344 \; ; \quad (V)_{t_1}^{t_2} = 439{,}5 \; ; \quad K^2 = 1665 \, .$$

TABLEAU IX.

Béton : série G_3, N° 4 — Pression : 8 kg./cm² — Age : 9 mois

Jours (1)	Temps moyens (2)	Volumes écoulés totaux (3)	Volumes écoulés partiels (4)	Débits moyens (5)	K^2 moyens (6)
57	(1368)	.....	.....	.....	.....
58	1380	38	38	1,583	2185
59	1404	77	39	1,625	2281
60	1428	115	38	1,583	2261
61	1452	152,5	37,5	1,562	2268
62	.....	.....	.....	.....	.....
63	1488	226,5	74	1,541	2293
64	1524	261,5	35	1,458	2222
65	1548	295,5	34	1,416	2192
66	1572	328,5	33	1,375	2161
67	1596	362,5	34	1,416	2260
	(1608)				

$t_1 = 1368$; $t_2 = 1608$; $(V)_{t_1}^{t_2} = 362,5$; $K^2 = 2243$.

PRESSION A L'INTERIEUR DU BETON

Sous l'effet d'une pression maintenue sur la face supérieure d'un échantillon cubique, des filtrations se produisent à travers la masse du béton pour être recueillies sur la face directement opposée. Il apparaît sur toute celle-ci des suintements tombant sous forme de gouttes par la seule force de la pesanteur : la pression à l'intérieur du béton a donc varié d'une certaine valeur pour tendre vers zéro. En supposant que la pression p soit constante, on peut se demander quelle est la valeur de la pression interne en un point quelconque de la masse.

A cet effet, il suffit de ménager une cavité en un point quelconque et de la faire communiquer avec un manomètre par l'intermédiaire d'un ajutage. La cavité ainsi créée détruit évidemment la continuité du réseau capillaire par lequel les filtrations se produisent; elle présente l'avantage d'accumuler une certaine quantité d'eau à l'intérieur du béton ce qui permet de déterminer simplement la pression interne.

Nous avons réalisé l'expérience suivante permettant de connaître la valeur de la pression au centre d'un échantillon cubique.

Dans ce but, un échantillon a été coulé dans deux moules distincts, sur une hauteur de 10 cm. Pour avoir le maximum d'homogénéité dans la masse totale, les moules étaient alternativement remplis d'un béton de la série G4 (3) réparti par moitié dans chacun d'eux et pilonné d'une manière uniforme. Un des moules était traversé par un tube de cuivre de 3 mm. de diamètre intérieur et muni d'un ajutage permettant la fixation d'un manomètre métallique à l'une de ses extrémités.

Après deux jours de prise, les deux demi-échantillons ont été démoulés et piqués soigneusement à la boucharde sur toutes leurs

(3) Voir chapitre I, tableau I.

faces. Le bouchardage a été plus important sur deux des faces de manière à pratiquer une cavité ayant la forme d'un parallélipipède droit à base carrée de 15 cm. de côté et 0,5 cm. de hauteur environ.

Les deux demi-échantillons ont alors été placés l'un sur l'autre, dans le sens de leur pilonnage, de manière que les deux cavités forment une cavité centrale unique. Ils ont été scellés au mortier de ciment (fig. XIV).

Le cube ainsi construit a été conservé à l'air pendant 28 jours puis mis en place dans un des pots de la baterie de perméabilité.

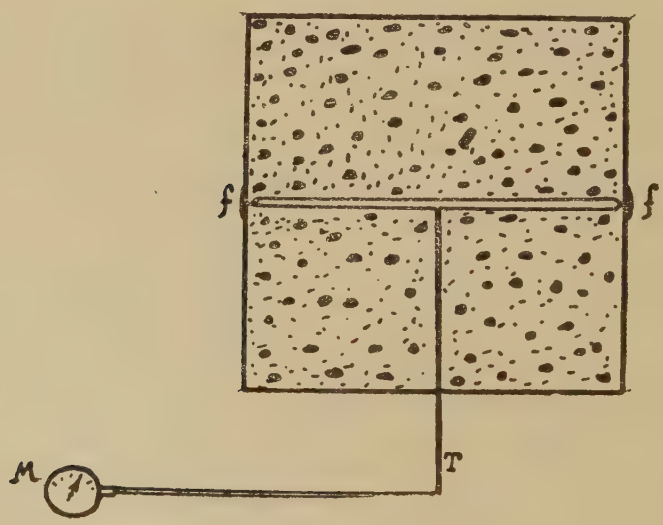


Fig. XIV

f : fichage au ciment.
T : Tube de cuivre de 3 mm. de diamètre.
M : Manomètre métallique.

L'essai a commencé, après 30 jours de prise, sous une pression constante de 6 kg. par cm².

Les premiers résultats obtenus ont été les suivants :

Heure de lecture	Pression centrale en kg./cm²	Imprégnation de la face inférieure
15 H	Mise en pression	
16 H	0,5	Aucune
17 H	2	Partielle
18 H	3	Totale

L'imprégnation partielle de la face inférieure du cube, après une durée de pression de deux heures, n'a pas commencé au voisinage de la sortie du tube de cuivre : l'adhérence du tube au béton était donc complète et il n'y avait pas lieu de craindre des pertes de pression.

La figure XV permet de se rendre compte de la marche de l'expérience par la comparaison des graphiques du débit horaire moyen et de la pression en fonction du temps. On peut constater que la cavité centrale a amené, dans la variation du débit, une certaine perturbation pendant laquelle la pression interne est passée par un maximum : cette perturbation s'étend, sur le graphique, depuis A jusque B et le débit horaire moyen ne suit pas pendant ce temps, la loi de variation hyperbolique. A partir de B la pression interne diminue progressivement jusqu'en C pour se stabiliser à 3 kg. par cm² jusqu'à la fin de l'expérience.

Nous avons constaté qu'à partir de C. la variation du débit horaire moyen se confond très sensiblement avec une branche d'hyperbole équilatère dont l'axe des ordonnées passerait par le point

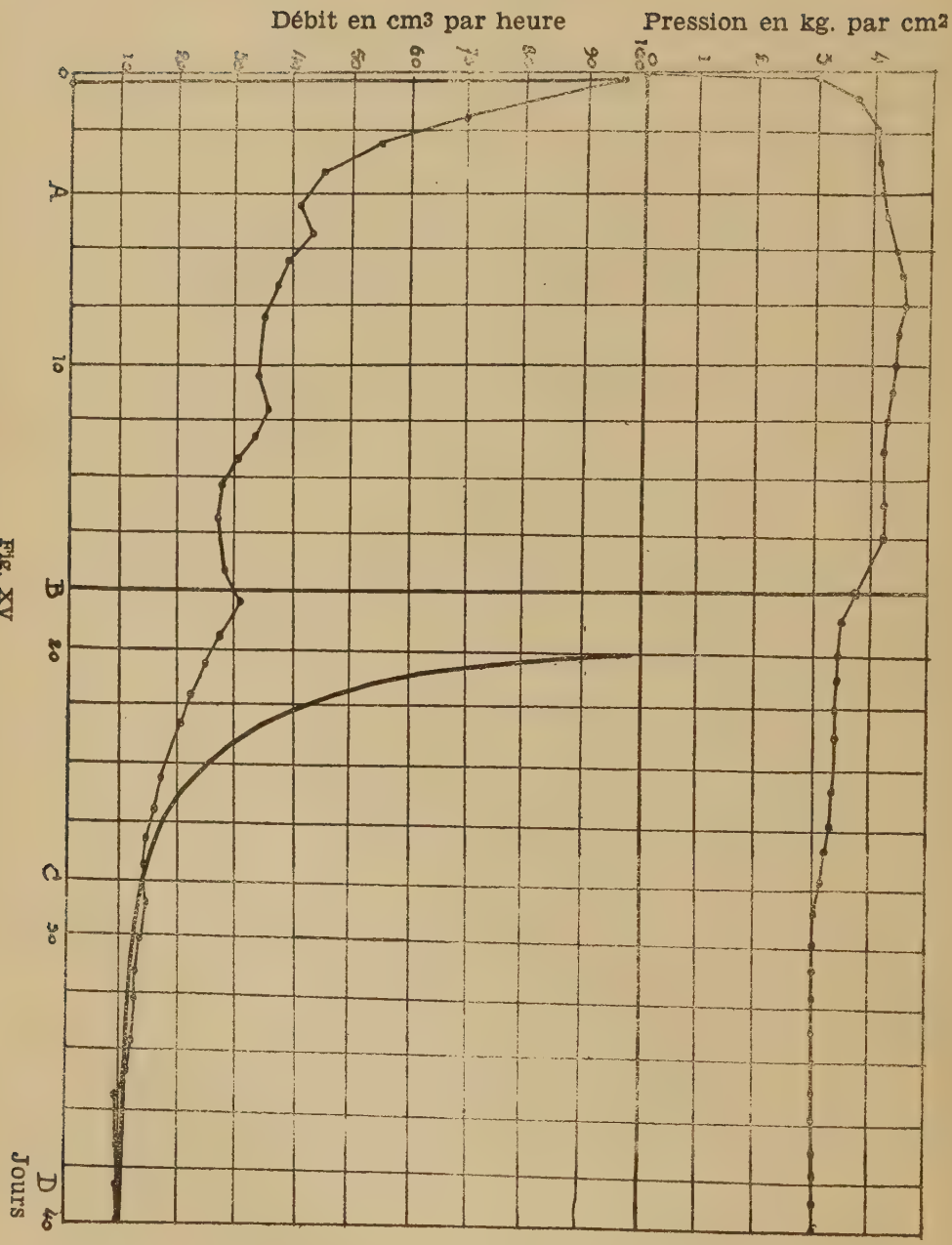

Débit en cm3 par heure
Pression en kg. par cm2
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
1
2
3
4
A
B
C
D
10
20
30
40
Jours

Fig. XV.

B. De plus le coefficient spécifique calculé pendant l'intervalle de temps CD est pratiquement égal au coefficient correspondant à OA. La perturbation résultant de la cavité équivaudrait donc, sur l'axe des temps, à une translation simple d'amplitude BA et la variation du débit pendant l'intervalle de temps BC serait analogue à celle que nous avons déjà fait constater sur la figure XI : la variation se ferait de telle sorte que le loi hyperbolique tendrait à être satisfaite. D'après le graphique expérimental (fig. XV), le raccordement en C des deux branches BC et CD représentatives du débit a lieu au moment où la stabilisation de la pression commence.

La conclusion générale de cet essai serait donc que le phénomène de la perméabilité d'un béton pourrait se représenter graphiquement par deux courbes (fig. XVI) obtenues en portant en abscisses les temps et, en coordonnées, la valeur du débit horaire moyen et celle de la pression interne. La correspondance de ces deux courbes montre que la loi hyperbolique commencerait à l'instant t_o à partir duquel la pression interne devient constante au centre de l'échantillon. La valeur de cette pression serait égale à la moitié de la valeur de la pression de l'eau au contact de la face supérieure du béton : nous reviendrons sur cette remarque en étudiant la variation de la perméabilité en fonction de l'épaisseur traversée.

RESUME.

Nous avons montré, dans ce chapitre, l'influence de la valeur d'une pression constante sur l'allure générale des graphiques de perméabilité, et en particulier sur l'importance des premiers écoulements recueillis. Nous avons rapporté, ensuite, les résultats obtenus à la suite d'une série d'expériences effectuées sous des pressions variables. La conclusion de cette étude est la suivante : à

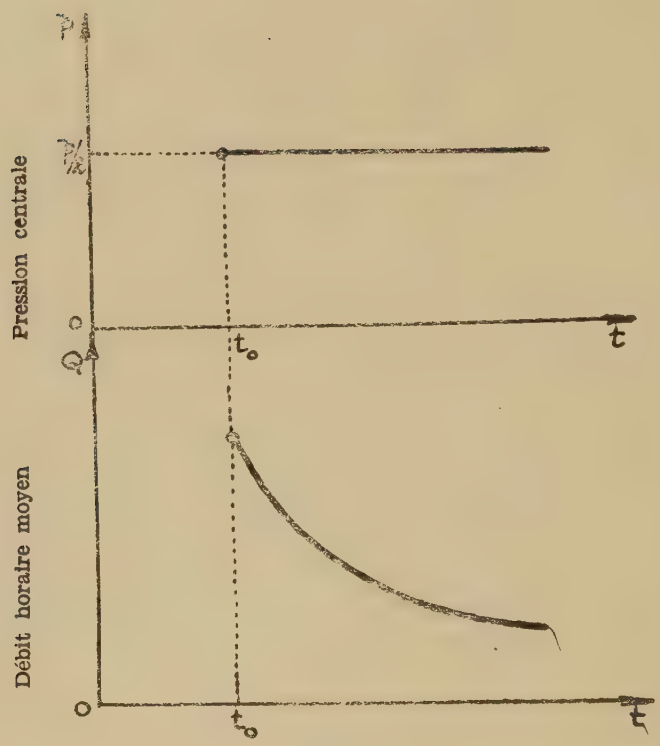


Fig. XVI

Correspondance de la variation du débit et de la pression centrale.

toute variation de pression correspond une variation de perméabilité dans le même sens. Nous avons remarqué, à ce sujet, que la perméabilité n'est pas une fonction « uniforme » de la pression, mais que cependant il était possible d'obtenir des résultats systématiques en opérant de telle sorte que la variation de pression se fasse toujours dans le même sens : dans ce dernier cas particulier l'expérience montre que la perméabilité est une fonction linéaire de la pression pour des valeurs de celle-ci comprises entre 0 et 8 kg. par cm^2, pression maximum utilisable avec l'appareillage dont nous disposions.

En terminant, nous avons exposé les résultats obtenus dans une expérience effectuée dans le but de déterminer la valeur de la pression dans la masse même d'un béton. Cette expérience met en évidence le fait, qu'au centre d'un échantillon cubique, la pression se stabilise à la moitié de sa valeur initiale, après un certain temps : ce temps correspond à celui à partir duquel la variation du débit horaire moyen de l'écoulement, en fonction du temps, satisfait la loi hyperbolique précédemment énoncée.

CHAPITRE V

INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DU BETON

VARIATION DE LA PRESSION INTERNE.

En déterminant la valeur de la pression interne au centre d'un échantillon cubique de béton, nous avons montré, dans le chapitre précédent, que pour une pression de 6 kg. par cm² sur la surface supérieure, cette pression centrale se stabilisait à 3 kg. par cm². En opérant, avec le même échantillon, sous une nouvelle pression de 8 kg. par cm², la pression centrale se stabilise rapidement à 4 kg. par cm². La valeur est donc la moitié de celle développée sur la face supérieure.

On peut constater expérimentalement, qu'après filtration à travers la masse de béton, l'eau apparaît sur la face inférieure sous forme de gouttes tombant par leur propre poids : la pression semblerait donc être nulle sur cette face. Dans ces conditions, la variation de la pression interne se ferait suivant le diagramme représenté par la figure XVII : en chaque point, sa valeur diminuerait linéairement au fur et à mesure que l'épaisseur de béton à traverser augmente.

Cette variation n'est linéaire que pendant la période du phénomène de la perméabilité pour laquelle la loi hyperbolique est vérifiée. La pression interne se stabilise de telle manière que sa valeur soit suffisante pour traverser le béton de part en part.

Au contraire, pendant la période de perturbation et d'établissement du régime, la pression centrale varie comme le débit des

écoulements (fig. XV). Dans ce cas, en un point quelconque de la masse, la pression interne prend la valeur maximum susceptible de permettre, si elle est possible, la filtration à travers toute l'épaisseur du béton.

VARIATION DE LA PERMEABILITE.

Dans toutes les expériences précédentes, la mesure de la perméabilité d'un béton déterminé a été faite sous une pression constante et sur un échantillon cubique de 20 cm. d'épaisseur.

Pour étudier l'influence de l'épaisseur sur la perméabilité, il faudrait réaliser une série de mesures sur des bétons de même composition, soumis à la même pression, et ayant des épaisseurs différentes. Nous avons déjà fait remarquer que cette étude était

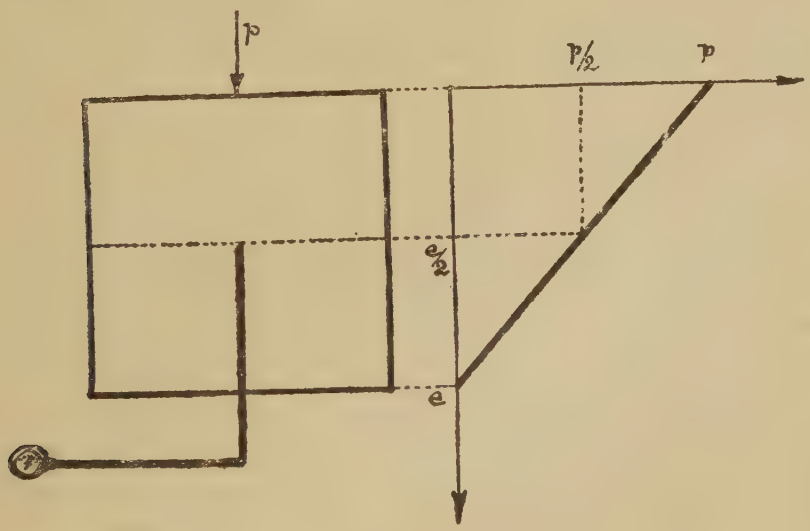


Fig. XVII

Variation de la pression interne avec l'épaisseur.

illusoire, étant donné que, sous une même pression, des échantillons de même composition et de même épaisseur n'ont pas le même coefficient spécifique.

Nous pensions tourner la difficulté en faisant des mesures successives sur l'échantillon cubique représenté par la figure XIV, en déterminant pour la même pression :

1. - Le coéfficient spécifique de l'échantillon cubique total.

2. - Le coefficient spécifique du demi-cube supérieur, la détermination de ce coefficient se faisant en recueillant, dans une éprouvette graduée, les écoulements obtenus à travers l'ajutage après enlèvement du manomètre métallique.

3. - Le coefficient spécifique du demi-cube inférieur, la détermination de ce coefficient se faisant en enlevant le demi-cube supérieur et en arasant le brai au niveau du nouvel échantillon ainsi formé.

Les résultats obtenus à la suite de ces différentes mesures sont incompatibles entre eux. Cette incompatibilité ne peut s'expliquer qu'en admettant que l'échantillon cubique est modifié par suite de la filtration continue à travers la masse. Les différente éléments de béton ont les mêmes propriétés dans des plans perpendiculaires au passage de l'eau, ces propriétés variant avec l'épaisseur de la masse traversée.

L'hypothèse d'un colmatage des différents canaux, dont l'ensemble constitue un réseau capillaire dans la structure du béton, est donc logique. Le processus, suivant lequel ce colmatage se ferait, est mis en évidence par les expériences suivantes que nous allons exposer.

INFLUENCE DU SENS DU PASSAGE DE L'EAU SUR LA PERMEABILITE.

La mesure de la perméabilité a été faite, dans toutes nos expériences, pour un passage d'eau sous pression s'effectuant toujours dans le même sens et d'une manière continue. Chaque échantillon est alors caractérisé, comme nous l'avons montré, par un coefficient spécifique de sa perméabilité sous une pression donnée et constante. Il reste à déterminer si ce coefficient est indépendant, pour les mêmes conditions expérimentales, du sens du passage de l'eau à travers la masse.

Nous avons réalisé, à cet effet, sur deux échantillons de la série G_1 (1) les expériences suivantes comportant chacune deux essais : un premier essai dans lequel la filtration d'eau se faisait, dans un sens donné, et un second dans lequel la filtration d'eau se faisait, suivant le cas, soit dans un sens perpendiculaire, soit dans le sens directement opposé à celui du premier essai (fig. XVIII.)

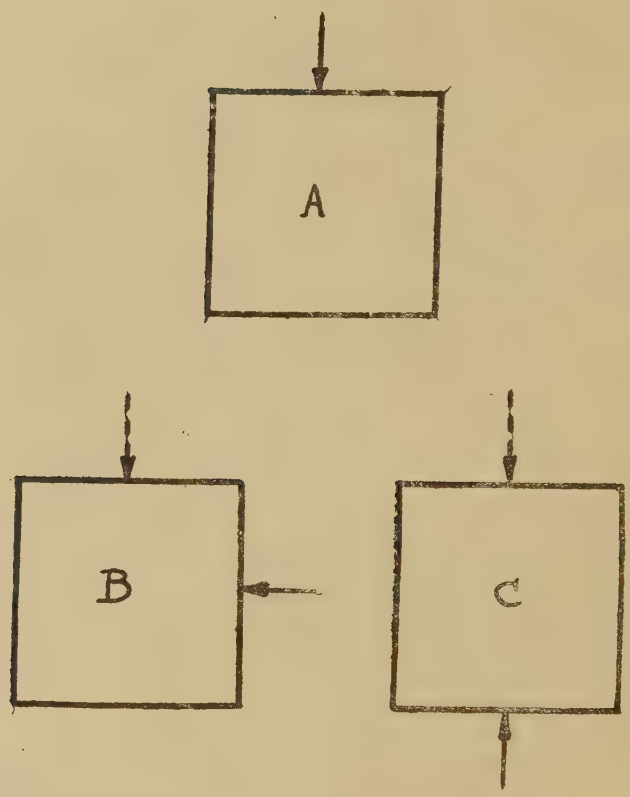
Pour réaliser ces expériences, les échantillons cubiques étaient sortis des pots de perméabilité après le premier essai, et replacés de façon que le passage de l'eau se fasse dans le sens indiqué. Une fois le brai coulé, la pression était rétablie à sa valeur primitive, l'interruption de la pression n'excédant pas une durée totale de 48 heures.

Les résultats obtenus ont été les suivants :

Béton série G_1	Coefficient spécifique	
	Essai N°1	Essai N° 2
Expérience N° 1	519	487
Expérience N° 2	243	120

(1) Voir Chapitre I, Tableau I.

A } Expériences N° I et II.
Essais N° I.



B } Expérience N° I.
Essai N° II.

C } Expérience N° II.
Essai N° II.

Fig. XVIII

Sens du passage des filtrations d'eau suivant les essais.

Les seconds essais ont été effectués, pour la première expérience, dans un sens perpendiculaire à celui du premier essai, et dans le sens directemnt opposé pour la seconde expérience.

On peut constater que les coefficients spécifiques obtenus sont sensiblement les mêmes pour une filtration se faisant successivement dans un sens ou dans un sens perpendiculaire; la diminution du second coefficient ne tient, en effet, qu'à l'interruption de la pression, résultat que nous avons déjà remarqué précédemment dans le chapitre IV. Par contre, les coefficients sont nettement différents quand le second passage se fait dans le sens directement opposé au premier. De plus, dans ce cas, les premières filtrations ne se sont produites qu'après une durée de plusieurs jours pendant laquelle l'échantillon était absolument étanche.

Le sens du passage des filtrations ne semble donc pas influer sur la perméabilité d'un béton quand ce sens est perpendiculaire à celui d'un passage antérieur, mais son influence est importante si les filtrations sont produites dans le sens inverse.

Ces résultats expérimentaux permettent de faire l'hypothèse suivante sur le processus d'un colmatage du béton entraînant la diminution du débit des écoulements avec le temps.

PROCESSUS DU COLMATAGE.

Par suite d'une filtration continue de l'eau à travers la masse d'un béton, il se forme sur la face inférieure de celui-ci des dépôts de carbonate de chaux. Nous avons constaté que ces dépôts sont peu importants avec des bétons relativement étanches, mais qu'ils deviennent, au contraire, très nombreux et volumineux pour des bétons très perméables. Il se forme, dans ce deuxième cas, aux différents points de filtration de l'eau sur la face inférieure des stalactites recouvrant presque complètement cette surface.

Après écrasement des échantillons, nous avons remarqué l'existence de cristaux de carbonate de chaux dans la structure de la masse des bétons. L'importance de ces cristaux diminue de la face inférieure à la face supérieure qui est au contact de l'eau sous pression.

Les deux essais précédents peuvent donc être interprêtés de la manière suivante :

1. - Quand, pour un même échantillon, les filtrations se produisent successivement dans un sens donné et dans le sens directement opposé, l'eau sous pression se trouve, dans ce dernier cas, au contact d'une couche de carbonate de chaux cristallisé. Pour traverser l'échantillon, les filtrations doivent donc commencer par vaincre cette résistance avant de pouvoir pénétrer dans les canaux capillaires : c'est ce qui permet d'expliquer l'étanchéité du béton au début des essais effectués dans ces conditions.

Une fois les premiers écoulements obtenus, nous avons constaté que la nouvelle face inférieure présente les mêmes cristaux de carbonate de chaux. Le passage de l'eau entraîne donc une diffusion de chaux et de carbonate de chaux à travers toute la masse, de la partie supérieure à la partie inférieure de l'échantillon. Cette diffusion, se faisant en sens inverse de la première, est la cause principale de la diminution de filtrations.

2. - Quand les filtrations se produisent dans un sens donné et dans un sens perpendiculaire, l'eau sous pression ne rencontre pas, dans ce second cas, de couche cristallisée : la perméabilité est donc la même. On peut admettre que la carbonatation se ferait dans le premier cas par couches, et perpendiculairement au sens du passage de l'eau. Cette carbonatation commencerait par être superficielle et localisée au voisinage de la face inférieure, pour s'élever avec le temps dans toute la masse du béton.

RESUME.

Dans ce dernier chapitre, nous avons exposé différentes expériences concernant d'une part la variation de la pression interne de l'eau de filtration avec l'épaisseur traversée, et, d'autre part, l'influence du sens du passage de l'eau sur la perméabilité d'un béton.

De ces résultats, et en considérant que les mesures de la perméabilité d'un même échantillon, faites sous différentes épaisseurs sont incompatibles entre elles, nous avons conclu que les couches de béton successivement traversées par les filtrations, n'ont pas, à un instant donné, les mêmes propriétés physiques. Un phénomène d'ordre chimique a donc lieu par suite de la filtration d'eau; il aurait pour conséquence un colmatage du béton, se faisant en sens inverse des filtrations et pendant toute la durée de celles-ci.

CONCLUSION

De notre étude « Sur les écoulements d'eau sous pression à travers une masse de béton », nous pouvons dégager la conclusion générale suivante : le phénomène de la perméabilité est à la fois un phénomène d'ordre physique et chimique. Il comprend plusieurs périodes que nous pouvons décomposer ainsi :

1. - Période de perturbation et d'établissement de régime, commençant à partir de la mise en pression de l'eau en contact avec le béton. Des filtrations commencent par se produire dans les canaux du réseau capillaire existant dans la structure de la masse. Le débit des écoulements produits et la pression interne vont en augmentant jusqu'à prendre une valeur maximum; la pression interne prend, en chaque point, la plus grande valeur susceptible de permettre la filtration de l'eau à travers toute l'épaisseur à traverser.

2. - Période transitoire, pendant laquelle le débit et la pression interne diminuent progressivement. L'eau diffuse la chaux libre du ciment en excès dans le béton, à travers toute la masse, de la partie supérieure à la partie inférieure. Premiers dépôts de carbonate de chaux s'étendant à toute la surface inférieure du béton.

3. - Période de colmatage pendant laquelle la pression interne se stabilise à une valeur suffisante pour que les filtrations se produisent de part en part du béton; le débit diminue avec le temps suivant une loi hyperbolique. Le colmatage se poursuit à l'intérieur de la masse et en sens inverse des filtrations.

Pendant cette dernière période, de beaucoup la plus impor-

tante, le béton peut se caractériser, pour une pression et une épaisseur données, par un coefficient indépendant du temps et spécifique de sa perméabilité. La détermination de ce coefficient nous a permis de poursuivre l'étude de la perméabilité avec la pression.

Les expériences que nous avons effectuées à cet effet, ont montré que la perméabilité n'est pas, en général, une fonction uniforme de la pression. Cette fonction devient linéaire en opérant par pression variant toujours dans le même sens, mais dépend toutefois des valeurs antérieures prises par la pression. En particulier nous avons constaté qu'un béton soumis successivement à différentes pressions croissantes est beaucoup moins perméable, pour une pression donnée, que s'il est soumis directement à une de ces pressions intermédiaires : le même résultat est atteint par un arrêt de la pression.

Enfin, en mesurant la résistance à la compression après essai de perméabilité, nous avons toujours obtenu une résistance inférieure à celle d'un béton non soumis aux essais. Cette diminution, fonction de la durée de filtration, est de 20% en moyenne pour un essai de perméabilité de 30 jours. Une filtration d'eau sous pression à travers un béton entraîne une certaine quantité de chaux libre du ciment; elle appauvrit donc le dosage et peut entraîner une destruction.

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

QUALITES ELECTROLYTIQUES DES EAUX INDUSTRIELLES

Vu et approuvé :

Paris, le décembre 1937

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

G. ROUSSY